



Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas

Experiência brasileira

Vanderlise Giongo
Francislene Angelotti

Editoras Técnicas



Embrapa

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Semiárido
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas

Experiência brasileira

Vanderlise Giongo
Francislene Angelotti

Editoras Técnicas

Embrapa
Brasília, DF
2022

Embrapa Semiárido
Rodovia BR-428, Km 152, Zona Rural
CEP: 56302-970 Petrolina, PE
Fone: +55 (87) 3866-3600
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Responsável pelo conteúdo
Embrapa Semiárido

Comitê Local de Publicações

Presidente

Natoniel Franklin de Melo

Secretária-executiva

Juliana Martins Ribeiro

Membros

Alineaura Florentino Silva

Clarice Monteiro Rocha

Daniel Nogueira Maia

Geraldo Milanez de Resende

Gislene Feitosa Brito Gama

José Maria Pinto

Magnus Dall'Igna Deon

Paula Tereza de Souza e Silva

Pedro Martins Ribeiro Júnior

Rafaela Priscila Antônio

Sidinei Anuniação Silva

Responsável pela edição

Embrapa, Superintendência de Comunicação

Coordenação editorial

Carla Alessandra Timm

Nilda Maria da Cunha Sette

Supervisão editorial

Josmária Madalena Lopes

Revisão de texto

Francisca Elijani do Nascimento

Normalização bibliográfica

Márcia Maria Pereira de Souza

Projeto gráfico, diagramação e capa

Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Fotos da capa

Magna Soelma Beserra de Moura

1ª edição

Publicação digital (2022): PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei n° 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa, Superintendência de Comunicação

Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas : experiência brasileira / Vanderlise Giongo, Francislene Angelotti, editoras técnicas. – Brasília, DF : Embrapa, 2022.

PDF (256 p.). : il. color.

ISBN 978-65-89957-12-6

1. Recursos naturais. 2. Agricultura sustentável. 3. Efeito estufa. 4. Políticas públicas. I. Giongo, Vanderlise. II. Angelotti, Francislene. III. Embrapa Semiárido.

CDD 551.68

Márcia Maria Pereira de Souza (CRB-1/1441)

© Embrapa, 2022

Autores

Alessandra Monteiro Salviano

Engenheira-agrônoma, doutora em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisadora da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Ana Dolores Santiago de Freitas

Engenheira-agrônoma, doutora em Tecnologias Energéticas Nucleares, professora da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE

André Julio do Amaral

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos (UEP Recife), Recife, PE

Antonio Rocha Magalhães

Economista, pós-doutor em Economia, consultor, Brasília, DF

Bárbara França Dantas

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Belinda Pereira Cunha

Advogada, doutora em Direito, professora da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB

Carolina Vianna Morgante

Bióloga, doutora em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisadora da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Claudemiro de Lima Júnior

Bacharel em Engenharia Mecânica, doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares, professor da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE

Davi José Silva

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Diana Signor Deon

Engenheira-agrônoma, doutora em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisadora da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Edilene Pereira Andrade

Engenheira ambiental, mestre em Engenharia Civil (Saneamento Ambiental), estudante de doutorado em Nanociência, Materiais e Engenharia Química na Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, Espanha

Emmanuel Damilano Dutra

Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, doutor em Tecnologias Energéticas Nucleares, professor da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE

Emília Hamada

Engenheira agrícola, doutora em Engenharia Agrícola, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Evandro Neves Muniz

Engenheiro-agrônomo, doutor em Zootecnia, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE

Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, professor da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE

Flávio Adriano Marques

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos (UEP Recife), Recife, PE

Franciele Weschenfelder

Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente, doutora em Engenharia Mecânica, gerente de assuntos regulatórios da Eólica Tecnologia Ltda, Recife, PE

Francislene Angelotti

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Glacyane Costa Gois

Zootecnista, doutora em Zootecnia, bolsista de pós-graduação, Petrolina, PE

Gustavo de Novaes Pires Leite

Engenheiro mecânico, doutor em Engenharia Mecânica, professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, PE

Jose Antonio Marengo

Bacharel em Física e Meteorologia, doutor em Meteorologia, pesquisador do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, Cachoeira Paulista, SP

José Coelho de Araújo Filho

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências (Geoquímica e Geotectônica), pesquisador da Embrapa Solos (UEP Recife), Recife, PE

José Henrique de Albuquerque Rangel

Engenheiro-agrônomo, doutor em Tropical Agriculture, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE

José Ivaldo Alves de Oliveira Silva

Advogado, doutor em Ciências Sociais, professor da Universidade Federal de Campina Grande, Sumé, PB

Juliana Ribeiro Costa Pereira

Engenheira agrícola e ambiental, mestre em Tecnologia Ambiental para o Semiárido, doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo na Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR

Maria do Socorro

Conceição de Freitas
Tecnóloga em Gestão de Fruticultura Irrigada, doutora em Agronomia, professora do Instituto Federal do Sertão Pernambucano, Campus Ouricuri, PE

Maria Cléa Brito de Figueirêdo

Bacharel em Ciência da Computação, doutora em Engenharia Civil, pesquisadora da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

Marília Castelo Magalhães

Economista, mestre em Desenvolvimento Internacional, consultora do Banco Mundial, Brasília, DF

Mônica da Silva Santana

Bióloga, doutora em Ecologia e Recursos Naturais, Fortaleza, CE

Pauliana Valéria Machado Galvão

Cirurgiã-dentista, doutora em Epidemiologia (Modelagem Estatística, Matemática e Computacional Aplicada à Saúde), professora e pesquisadora da Universidade de Pernambuco, Campus Serra Talhada, Serra Talhada, PE

Rafael Dantas dos Santos

Médico-veterinário, doutor em Zootecnia, pesquisador da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Regina Lúcia Félix de Aguiar Lima

Bióloga, doutora em Tecnologias Energéticas Nucleares, professora da Universidade de Pernambuco, Petrolina, PE

Roberto Marinho Alves da Silva

Bacharel em Filosofia, doutor em Desenvolvimento Sustentável, professor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN

Rogério Gonçalves de Oliveira

Zootecnista, doutor em Ciência Animal, Petrolina, PE

Rômulo Simões Cezar Menezes

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências Agrárias, professor da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE

Rubens Sonsol Gondim

Engenheiro-agrônomo, doutor em Engenharia Civil, pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

Samuel Figueiredo de Souza

Médico-veterinário, doutor em Zootecnia, analista da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE

Tadeu Vinhas Voltolini

Zootecnista, doutor em Ciências Animal e Pastagens, pesquisador da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Tatiana Ayako Taura

Engenheira cartógrafa, mestre em Ciências Geodésicas, analista da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

**Tony Jarbas Ferreira Cunha
(in memoriam)**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Ubiratan Piovezan

Zootecnista, doutor em Ecologia, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE

Vanderlise Giongo

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS

**Valdomiro Severino
de Souza Júnior**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, professor da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE

Viviane da Silva Barros

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitotecnia, estudante de pós-doutorado na Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE

Yony de Sá Barretto Sampaio

Engenheiro-agrônomo, doutor em Economia Agrícola, professor da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE

Apresentação

O aumento da concentração dos gases de efeito estufa (GEE) a partir da revolução industrial se tornou um alerta para as atividades antrópicas. Ampliando-se o grau de informação sobre as consequências que as emissões desses gases têm para a vida no planeta, a opção por estratégias de produção que resultem em mínimo impacto ambiental tornou-se uma necessidade. Fortalecendo o conceito e a perspectiva da sustentabilidade, o presente livro traz, à luz da visão sistêmica, interconectada e interdependente, os fatores, fenômenos e processos que ocorrem no Semiárido brasileiro para desenvolver uma agricultura de baixa emissão de carbono.

Nessa ótica, a pesquisa tem tido um papel importante para promover a sustentabilidade, nas vertentes ambiental, econômica e social, frente aos impactos negativos dos cenários climáticos sobre os ambientes naturais e os sistemas agropecuários. Entretanto, a partir desse desafio, surgiram novas oportunidades, por meio da integração de ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação, resultando na proposição de tecnologias que promovem a adaptação dos sistemas de produção e contribuem para a segurança alimentar e o controle das emissões dos GEE.

Tecnologias e práticas sustentáveis são alternativas imperativas para aumentar o estoque de carbono e reduzir os impactos das mudanças climáticas, aumentando a produtividade dos agroecossistemas no Semiárido. Este livro descreve algumas estratégias e práticas agrícolas que podem ser utilizadas como tecnologias de baixa emissão de carbono e contribuem para a construção de agroecossistemas sustentáveis. Entre elas, destacam-se a seleção de espécies de plantas tolerantes aos estresses bióticos e abióticos, uso de condicionadores de solo com múltiplas funções, adoção de sistemas de plantio direto, uso de adubos verdes (coquetel vegetal), tecnologias para estocar água e melhorar sua eficiência e produtividade, a incorporação de fontes energéticas renováveis, experiências de integração lavoura-pecuária-floresta e desenhos de agroecossistemas multifuncionais. Todas essas estratégias precisam ser analisadas e integradas às estruturas edafoclimática, econômica, política e social do Semiárido.

Além de apresentar as pesquisas desenvolvidas no Semiárido, o livro traz análise e elementos para a proposição de políticas públicas, associadas à necessidade de aumentar a capacidade adaptativa e mitigatória da sociedade e da economia regional diante das mudanças climáticas. Essas informações e o avanço do conhecimento contextualizado que foram reunidos neste livro poderão contribuir para o fortalecimento da capacidade de condução de sistemas agrícolas sustentáveis em regiões semiáridas para fazer frente aos cenários climáticos.

Maria Auxiliadora Coêlho de Lima

Chefe-Geral da Embrapa Semiárido

Sumário

- 9** **Capítulo 1**
Uso e ocupação das terras semiáridas: um resgate histórico e perspectivas de médio e longo prazo
- 25** **Capítulo 2**
Território das secas e da convivência: trajetórias socioeconômicas e políticas da resistência sertaneja no Semiárido brasileiro
- 49** **Capítulo 3**
O clima no Semiárido do Nordeste do Brasil: tendências atuais e futuras
- 59** **Capítulo 4**
Recurso água: uma análise de limitações e potencialidade para a agricultura
- 73** **Capítulo 5**
A crise ambiental no Semiárido: a perspectiva do pensamento sistêmico
- 93** **Capítulo 6**
Solos do Semiárido: características e estoque de carbono
- 113** **Capítulo 7**
Estratégias para sequestro de carbono: experimentação de modelos
- 127** **Capítulo 8**
Fundamentos para o desenho de agroecossistemas multifuncionais adaptados às condições de semiaridez
- 141** **Capítulo 9**
Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta para o Semiárido
- 151** **Capítulo 10**
Estratégias de mitigação dos efeitos das alterações do clima no Semiárido brasileiro e adaptação dos sistemas produtivos pecuários

- 169** **Capítulo 11**
Sementes nativas da Caatinga e clima futuro
- 185** **Capítulo 12**
Biotecnologia para a geração de plantas tolerantes à seca em um cenário de mudanças climáticas
- 201** **Capítulo 13**
Estratégias de adaptação para o manejo de doenças de plantas em regiões semiáridas sob os impactos das mudanças climáticas
- 211** **Capítulo 14**
Condicionadores de solo como estratégia tecnológica à preservação: potencialidade do uso de biocarvão em regiões semiáridas
- 223** **Capítulo 15**
Energias renováveis: estratégia para o desenvolvimento sustentável
- 243** **Capítulo 16**
Planos para o desenvolvimento sustentável do Semiárido brasileiro

Uso e ocupação das terras semiáridas

Um resgate histórico e perspectivas de médio e longo prazo

Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio

Yony de Sá Barretto Sampaio

Rômulo Simões Cezar Menezes

Ana Dolores Santiago de Freitas

Introdução

A região semiárida do Nordeste do Brasil difere da maioria das outras regiões semiáridas do mundo pela sua localização muito próxima à Linha do Equador e seu regime de chuvas (C), em geral mais complexo e mais abundante (Sampaio, 2010; Andrade et al., 2017). Com isso, o Semiárido nordestino brasileiro tem temperaturas médias mais altas ao longo de todo o ano (em geral acima de 25 °C), precipitações médias anuais que variam de 300 mm a 1.000 mm e evapotranspirações potenciais (EP) anuais em torno de 2.000 mm, resultando em índices C:EP abaixo dos 0,5, que definem os semiáridos (Reddy, 1983). As precipitações concentram-se em 3 a 5 meses do ano e são mais erráticas e menos abundantes no núcleo semiárido que nas zonas de transição para as regiões mais úmidas em todo o entorno, especialmente a leste e a oeste. Em intervalos de poucas dezenas de anos, as chuvas são ainda mais escassas por 2 a 5 anos seguidos, constituindo o fenômeno da “seca” (Alves, 1953; Sampaio, 2007).

A topografia é dominada pelas elevações das chapadas sedimentares da Ibiapaba, Araripe, Diamantina e Serra Grande e pelo maciço cristalino da Borborema (Sampaio, 1995). As chapadas fazem parte do antigo leito sedimentar, elevado há mais de 100 milhões de anos e que, desde então, vêm sendo erodidas pelas bordas,

descobrimo o escudo cristalino pré-cambriano. O maciço da Borborema é mais recente e sua erosão é generalizada. As elevações pouco ultrapassam os 1.000 m de altitude, exceto em pontos isolados da Diamantina. Nas encostas das chapadas e serras, estão as nascentes dos cursos de água que abrem caminho para o mar e são temporários, com poucas exceções, em que o Rio São Francisco é o principal deles. Na passagem, formam poucos lagos e lagoas, fundos o suficiente para não secar ao longo da estação de estio.

Essa combinação de clima e topografia resulta em baixa disponibilidade geral de água, mas cria também diferenças regionais, como clima mais ameno e mais chuvas nas áreas mais altas, principalmente da Borborema, nascentes de água nas encostas e sopés das chapadas e vales acumulando água e sedimentos vindos das encostas e tornando-se áreas mais favoráveis ao crescimento das plantas (Sampaio; Freitas, 2017). Das chapadas e serras do cristalino até os vales, a erosão cavou encostas, descobrimo o escudo pré-cambriano na parte leste do Semiárido e novas camadas sedimentares na parte oeste e tapando depressões com o material arrastado, de forma a compor o mosaico mais retalhado e com maior variedade de solos do Brasil (Sampaio, 2010). Toda essa diversidade de solos e disponibilidade de água condicionou, e ainda condiciona, a ocupação humana e o uso das terras (Sampaio et al., 2017).

Indígenas e ocupação pelos europeus

Os indígenas não possuíam instrumentos de metal, não praticavam pecuária, só tinham para transporte canoas e suas próprias forças e tinham uma agricultura rudimentar, do tipo itinerante. Não construíam reservatórios ou sistemas de condução de água, somente vasilhames domésticos de cerâmica. A necessidade de abastecimento fazia com que concentrassem suas povoações próximas às nascentes e aos cursos dos rios. Na maior parte do território Semiárido, a densidade populacional era baixíssima e, mesmo nos pontos de concentração, supõe-se que havia relativamente poucos habitantes, totalizando no máximo umas poucas dezenas de milhares em todo o Semiárido. Em torno desses pontos, a vegetação nativa era periodicamente derrubada a machado de pedra, e pequenas roças eram cultivadas por poucos anos antes de serem abandonadas à regeneração da Caatinga por mais algumas dezenas de anos. Fora dessas áreas, o impacto no ambiente restringia-se às caçadas, por vezes com queimadas para abrir clareiras e tanger os animais a serem abatidos.

No século anterior à chegada dos portugueses, o avanço dos tupi-guaranis pela costa, tanto vindos da Região Amazônica quanto do Sudeste, forçou a migração de muitas etnias costeiras para o interior, onde foram juntar-se à multiplicidade das outras que habitavam as áreas mais favoráveis do Semiárido. Pouco registro há dos efeitos desse afluxo que pode ter substituído ou se mesclado aos habitantes originais, mas sabe-se que muitas etnias não tupis, generalizadas por estes como “tapuias”, continuaram a prosperar e algumas ainda estão presentes até hoje. A ocupação dos europeus na zona costeira mais úmida, no século XVI, pode, por sua vez, ter originado uma nova leva de migrantes das tribos tupis para o interior, o que poderia ter aumentado a densidade demográfica, embora a entrada de novas doenças possa ter contrabalanceado esse efeito. Como mesmo as novas populações estavam sujeitas às limitações das

disponibilidades de água, possíveis adensamentos estavam restritos aos pontos com água mais acessível, que perfaziam menos de 5% da totalidade do Semiárido nordestino. Assim, o impacto dos indígenas no ambiente era concentrado e pequeno em relação à área total.

Os portugueses vieram em pequeno número até a metade do século XVI, levaram algumas décadas para ocupar as áreas úmidas costeiras de Pernambuco e Bahia e, só no último quarto do século, começaram lentamente a penetrar no Semiárido, a partir da costa baiana (Salvador, 1975; Abreu, 1982). Em Pernambuco, além de terem se concentrado na ocupação da costa, de Pernambuco ao Maranhão (Antonil, 1976) a penetração foi dificultada pelo maciço da Borborema e, até a metade do século XVII, pela ocupação holandesa. Os baianos, capitaneados pela Casa da Torre dos Dias d'Ávila, avançaram da costa norte da Bahia na direção noroeste cruzando o Rio São Francisco, e, acompanhando seus tributários, penetraram no Semiárido pernambucano, que se estendia também pelo que hoje é o oeste baiano (Livro..., 2012). Todo esse imenso território fazia parte de suas sesmarias, que, em geral, eram arrendadas pelos verdadeiros exploradores, portugueses e baianos (incluindo sergipanos), conhecidos como “os homens do São Francisco”. A partir desse interior pernambucano, os novos ocupantes transpuseram a Borborema para o Semiárido paraibano e, já no final do século XVII, transpuseram o Araripe para o sul do Ceará e sudeste do Piauí. Dessas áreas, deslocando-se para o leste e o norte, encontraram as levas pernambucanas que partiam das costas, subindo rios acima, na Paraíba, no Rio Grande do Norte e no Ceará (Bruno, 1967). Essas novas levas encontraram as frentes baianas nas cercanias de Campina Grande, na Paraíba, no Seridó do Rio Grande do Norte e no médio Jaguaribe cearense. Na última década, quando se iniciou a chamada Guerra dos Bárbaros, as frentes se mesclaram e completaram a submissão dos indígenas e o devassamento do sertão. Até a metade do século XVIII, todo o Semiárido estava ocupado com atividades tipicamente europeias e famílias estabelecidas.

Consolidação da ocupação de 1750 até 1900

Em todos os semiáridos do mundo com precipitações mais erráticas, a principal atividade rural é a pecuária (Ellis; Galvin, 1994). No Brasil, o motor da ocupação do Semiárido foi a pecuária bovina, levando a reboque cavalos, jumentos, cabras e ovelhas, criados juntos, e porcos e galinhas, criados nos terreiros (Lins, 1976). A ocupação consistia em levar um pequeno rebanho inicial para uma nova área, onde eram levantados um curral e alguma moradia rústica e plantadas roças com culturas anuais para abastecimento dos cuidadores do gado. As propriedades não eram cercadas, mas as roças eram, para evitar que as culturas fossem consumidas pelo gado e pelas miunças, como eram chamados os ovinos e caprinos. Não eram plantados pastos: os animais alimentavam-se da vegetação nativa, que podia ser queimada para diminuir a densidade de árvores e arbustos e aumentar a cobertura de herbáceas, o pasto preferencial. Mas todos os tipos de rebanho adaptaram-se ao ramoneio em árvores e arbustos – os ovinos em menor grau – e a comer as folhas secas caídas ao longo da estação sem chuvas. Também comiam os restos das roças após as colheitas. As roças, em geral nas várzeas e com menos de 10 ha, eram plantadas e capinadas com enxada e consorciavam mandioca ou milho e feijão com jerimum e alguma outra espécie também de ciclo curto, capaz de produzir dentro dos poucos meses da estação chuvosa e aproveitando a pouca água acumulada no solo.

À medida que a ocupação se distanciou da costa, a comunicação com os maiores centros urbanos, o grande mercado consumidor e entreposto dos produtos importados, incluindo ferramentas e peças metálicas, foi ficando mais difícil. As trilhas, percorridas a pé ou a cavalo, eram precárias e só em curtos trechos e com dificuldade permitiam a passagem de carroças e carros de boi. A região tornou-se quase autossuficiente, gerando a “civilização do couro” (Abreu, 1982), de casas parcamente mobiliadas, gente

de poucas vestimentas e outros bens móveis, exceto o gado, e pouca dependência da burocracia e da justiça oficial. Se a importação era restrita, a função abastecedora de carne e couros para os centros urbanos e as áreas de agricultura, principalmente na zona costeira, permaneceu como fundamental por todo o período. Os animais destinados ao abate eram tangidos em marchas que podiam durar meses, parando em logradouros mais favoráveis, mas quase invariavelmente perdendo peso na viagem. Há registros das marchas de gado vindo do interior da Paraíba para Salvador, passando por Cabrobó (Sampaio, 1997), e do Rio Grande do Norte e Paraíba que desciam para Goiana, na costa norte de Pernambuco, onde eram “recuperados” antes de aportarem ao Recife (Lins, 1976).

Os europeus mesclaram-se com a maioria dos indígenas, com influências culturais mútuas, mas com tendência a ignorar a contribuição nativa e a reconhecer a mistura como europeia. Como a grande maioria da imigração portuguesa era masculina, a miscigenação indígena predominou pelo lado feminino. Muitas das sedes das fazendas, em geral localizadas onde havia água disponível, foram agregando moradores, assim como os pontos de parada dos rebanhos na marcha para a costa. Quase todos os grupos indígenas foram reunidos em missões, transformadas em vilas pela ordenação pombalina, na metade do século XVIII, recebendo europeus à medida que cresciam. Pouquíssimos grupos indígenas mantiveram-se mais isolados, reconhecendo sua cultura original.

Ao longo do século XVIII, as pessoas e o gado multiplicaram-se, aumentando suas densidades e ocupando todos os rincões. Em 1777, a população total do Ceará a Alagoas era de quase 400 mil habitantes, a grande maioria nas cidades e vilas costeiras. Dos habitantes, cerca de 10% eram de índios, quase metade deles no Ceará (Alden, 1963). Com a maior demanda por alimento, as roças avançaram para áreas menos favoráveis, subindo as encostas, que têm menor disponibilidade de água e nutrientes que as várzeas. Parte da produção de carne, na porção mais ao norte da região, sem grandes centros

urbanos, passou a ser dirigida para charqueadas na costa do Piauí (Parnaíba), do Ceará (Coreaú, Acaraú e, principalmente, Aracati) e do Rio Grande do Norte (Assu), de onde era transportada de barco para abastecer as cidades costeiras mais ao sul e a região das minas gerais. Em Aracati, uma das principais regiões produtoras da época, foi registrado um abate anual de 20 mil bois (Rolim, 2012) que, considerando um desfrute de cerca de 8%, equivaleriam a uma população bovina de 360 mil cabeças, só para essa exportação. A produção sofreu um grande abalo com as secas de 1777 e de 1790 (Alves, 1953; Pompeu Sobrinho, 1953), que dizimaram os rebanhos e fecharam as charqueadas, transferidas para a região cisplatina (Rio Grande do Sul).

O gado europeu, especialmente os bovinos, foi adaptando-se, por seleção natural, às temperaturas altas e à baixa disponibilidade de água e à má qualidade da forragem na estação seca, reduzindo seu porte, retardando o crescimento e a primeira parição e espaçando os partos. A criação extensiva e a ausência de cercamento das propriedades desencorajavam qualquer esforço de seleção dos animais e de semeadura de pastos. O efeito do impacto do gado na vegetação não foi registrado por nenhum dos poucos relatos sobre a área. Assim, não se sabe qual a proporção do extrato baixo na biomassa total e quanto dessa biomassa acessível aos animais acumulava-se ao final da estação de chuvas. Provavelmente, a população de herbívoros nativos foi reduzida pela competição com o gado introduzido e pela caça com armas de fogo, mas não há dados a respeito e não se sabe quanto eles consumiam. O acúmulo dessa biomassa rasteira e seca podia ensejar a propagação de incêndios, como ainda ocorre na região dos cerrados. Isso poderia ser avaliado pela análise de carvão nos solos, mas quase nada foi publicado a respeito (Pessenda et al., 2010). Notícias de queimadas são raras porque os relatos escritos são simultâneos ou posteriores à chegada do gado e a biomassa rasteira já era então quase toda consumida e pisoteada pelos animais, como ainda acontece hoje em dia.

No século XIX, as secas afetaram periodicamente pessoas e rebanhos. A grande seca de 1877, quando as populações já eram maiores, causou enorme mortandade de animais e migrações de levadas de retirantes, tangidas pela carência de água e alimentos e pela ausência de renda. No final do século, habitavam, do Ceará a Alagoas, 3,4 milhões de pessoas, um aumento de oito vezes em relação a 1777, e somando Piauí, Sergipe e Bahia, 6,2 milhões. A repercussão dessa seca, as maiores circulações de informações e riqueza e a centralização de governo no Brasil levaram ao estabelecimento das primeiras medidas institucionalizadas de combate às secas. A providência mais efetiva foi o início da construção de grandes açudes e barragens públicas, que continuou por mais um século, criando enormes estoques de água (Assunção; Livingstone, 1993). A eles somaram-se a multiplicidade de reservatórios menores nas propriedades privadas, totalizando, na metade da década atual, mais de 2,6 mil com mais de 5 ha de superfície, a grande maioria deles (83%) do Ceará a Paraíba (Andrade et al., 2017). Todos eles pouco foram usados para o incremento na produção de alimentos, mas garantiram, e ainda o fazem, o fornecimento de água para pessoas e animais.

O algodão arbóreo, que já era explorado pelos indígenas, começou a se firmar como cultura comercial e foi alvo de estudos para a melhoria de seu uso no final do século XVIII (Câmara, 1982). No início do século seguinte, com a chegada da corte portuguesa e a abertura dos portos, a comercialização do algodão estendeu-se até a Inglaterra, com seu novo parque têxtil, fruto da revolução industrial. Nessa indústria, ele competia com o algodão herbáceo dos Estados Unidos e foi beneficiado quando o sul-americano foi convulsionado pela Guerra da Secessão. A produção expandiu-se, embora o mercado apresentasse flutuações (Palacios, 2004). No final desse século, a indústria têxtil nacional estabeleceu-se, assegurando mercado, o que estimulou a construção de bolandeiras e, posteriormente, já no século XX, de usinas processadoras do algodão, tendo como subprodutos do carroço o óleo e torta, largamente usada na

pecuária bovina, especialmente na produção leiteira. A produção de algodão ainda interagiu com a pecuária, devido à abertura das roças ao gado depois da colheita, e com a agricultura de subsistência, devido aos plantios consorciados nos três a cinco anos iniciais do estabelecimento dos algodoais. O conjunto das atividades era o sistema algodão-pecuária-agricultura de subsistência (Andrade, 1986). Grandes indústrias estrangeiras, como Anderson Clayton e Bung & Born, vinham adquirir o algodão no interior da região Nordeste. Com o declínio das fibras naturais, frente às sintéticas, e o avanço da indústria, o algodão entrou em lento declínio, precipitado pelo surgimento do bicudo-do-algodoeiro (*Anthonomus grandis* Bohema), na década de 1980, já do século XX. Ao final do século, a área cultivada com algodão arbóreo reduziu-se a menos de uma dezena de milhares de hectares, contrastando com os mais de 2 milhões de seu auge (Campos, 1991). A baixa produtividade e a grande demanda de mão de obra, especialmente na colheita, inviabilizaram, até hoje, o retorno do que já foi chamado de “ouro branco”.

Desde o final do século XVIII, áreas com maior disponibilidade de água em vales e serras foram especializando-se em culturas de ciclo mais longo que as cultivadas nos curtos meses de chuva. Muitas dessas áreas já haviam sido ocupadas por propriedades relativamente pequenas – se comparadas às fazendas de pecuária –, pertencentes a uma classe menos abastada e mais numerosa que a dos fazendeiros (Nunes, 2017). A cana-de-açúcar, já bem estabelecida na região costeira, ocupou muitas dessas áreas para produção de cachaça e de rapadura, comercializada para alimentação, principalmente de trabalhadores rurais. Nesse período, o Cariri cearense destacou-se como a maior das áreas mais úmidas encravadas no Semiárido que se especializou no cultivo da cana-de-açúcar, logo depois de sua colonização. Em ilhas e margens do São Francisco, pequenos cultivos irrigados garantiam o abastecimento de cidades ribeirinhas, e alguns produtos de mais fácil conservação, como cebola, eram vendidos para locais mais distantes, na própria região. A navegação

no trecho viável do São Francisco garantia o progresso de alguns centros, como Juazeiro, originalmente uma passagem do rio para travessia do gado e mercadorias. Em algumas serras, cajueiros e cafeeiros também proliferaram, apenas para consumo regional. Frutas introduzidas, como mangas, pinhas e seriguelas, e nativas, como umbu, cajá e jenipapo, eram plantadas ou mantidas nessas áreas, em pequena exploração local, sendo no máximo comercializadas nas feiras das vizinhanças.

Lenha era o único combustível disponível, desde o tempo dos indígenas, usado para cozinhar e, eventualmente, para afugentar os animais e esquentar as noites frias. Olarias, casas de farinha, padarias e engenhos de rapadura e cachaça aumentaram o seu uso. A abertura de roças fornecia a maior parte da lenha e da madeira usada nas construções das casas, currais e cercas de faxina. De espécies nativas, como o angico, vinha o material para curtir os couros e os muitos remédios herdados dos indígenas. A vegetação nativa, preservada como pasto e cobrindo ainda a maior parte da área semiárida, era uma fonte aparentemente inesgotável, para a qual as ordenações manuais de preservação das madeiras de lei e das matas pareciam não fazer falta.

Em volta das fazendas e nas áreas com maior quantidade de propriedades agrícolas, ao lado de primitivas capelas, foi se dando o adensamento populacional. As povoações transformaram-se em vilas e depois em cidades. Com a expansão do algodão, o adensamento populacional aumentou e novas nucleações surgiram. O transporte dos fardos ensejou uma nova logística, que se firmou com a construção de ferrovias que partiam das capitais litorâneas para o interior. Essas ferrovias, ainda que nunca tenham se fechado em uma malha viária conectada, melhoraram a circulação de bens e pessoas (Pinto, 1949). As paradas finais e algumas intermediárias, como Arcoverde e Campina Grande, desenvolveram-se como pontos de comércio, recebendo produtos da costa, que eram distribuídos nas áreas do entorno, e concentrando a produção dessas áreas, principalmente do algo-

dão arbóreo, que era remetido para a costa e daí para o exterior. Juazeiro teve o duplo benefício de ser a parada final dos trens vindos de Salvador e da navegação do São Francisco. O incremento do comércio local em todo o Semiárido levou à melhoria das estradas carroçáveis, embora todas ainda de terra até a metade do século XX. Os núcleos das fazendas, a marcha dos rebanhos e as paradas das linhas férreas deram origem às cidades e aos cerca de mil municípios que constituem a região hoje em dia (Instituto Nacional do Semiárido, 2012).

A dinâmica do desenvolvimento econômico e social no Nordeste muito deve à feição da ordenação econômica da ocupação e povoamento do Brasil em regiões quase autônomas do ponto de vista econômico. O movimento de marcha dos rebanhos para o interior, que determinou a ocupação dos sertões, esteve sempre ligado à produção da cana-de-açúcar, sendo a expansão do cultivo determinante para a penetração no interior (Furtado, 1967). Apesar de alguma interação entre as regiões brasileiras, a economia regional estava mais voltada ao exterior e ao atendimento do consumo da própria região. A interação entre regiões destacava-se por duas formas principais: a migração e envio de produtos agrícolas e gado para as minas gerais e centros urbanos da região Sudeste e a venda de escravos do Nordeste para o Sudeste no início da expansão do café. Esse fenômeno é crucial para entender desde a evolução da produção, inclusive os primórdios da industrialização no século XIX, até a construção de estradas de ferro, que sempre partiam do litoral para interior, sem a preocupação de interligação da malha. Esse quadro muda no século XX, quando são estabelecidas ligações rodoviárias entre as regiões brasileiras e o comércio interno nacional é expandido.

As grandes transformações de 1900 aos dias atuais

O século XX trouxe à região semiárida nordestina profundas transformações econômicas e sociais, que já vinham mudando o mundo, e

que foram chegando com algum atraso ao Brasil e mais ainda ao interior nordestino. O estabelecimento de fiações e tecelagens nas áreas costeiras criou um mercado mais próximo para o algodão. Máquinas a vapor, já estabelecidas há mais de 100 anos na Europa, foram importadas para substituir a força animal das bolandeiras em engenhos de cana-de-açúcar e de algodão. Outro marco decorreu da construção da hidroelétrica de Paulo Afonso e da instituição da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (Chesf), que possibilitou ainda mais o avanço da indústria, alterando progressivamente os hábitos de consumo e modos de vida das populações urbanas e rurais.

A introdução dos derivados de petróleo e dos automóveis, mais consistente depois da década de 1930, melhorou a circulação e, lentamente, conectou o mercado nacional. A facilitação na chegada de alimentos e na retirada das pessoas e a distribuição local de água foram reduzindo os efeitos mais perversos das secas na vida das populações. A construção de cisternas, já no século atual, tem sido a última tentativa de garantir o abastecimento de água da população rural. Barragens subterrâneas também têm sido construídas, mas ainda em pequeno número. Se a falta de água não é mais causa de mortes da população humana, a perda de renda na época das secas continua até hoje a afligir produtores rurais e seus agregados (Duarte, 1999; Sampaio, 2007). Já nos finais do século, bicicletas e motos de baixo custo popularizaram-se e substituíram cavalos, burros e jumentos como meio de transporte pessoal. Alguma tração de carroças continua, não se tendo firmado as puxadas por motos, como no sudeste asiático.

Nos meados do século, a industrialização na região Sudeste brasileira incluiu a produção de ferro e com ele o arame farpado, resultando em progressivo cercamento das propriedades, necessário para assegurar a melhoria dos rebanhos com a importação do gado Zebu. A indústria automobilística nacional aumentou em muito a circulação de caminhões e carros e, já depois da década 1970, forçou a pavimentação de muitas das rodovias principais. Depois disso,

o mercado consolidou-se a âmbito nacional, e até internacional para as grandes commodities, com suas consequências positivas e negativas. A eletrificação, como destacado, também avançou de meados do século até atingir praticamente toda a região antes do fim do século. Ela garantiu o estabelecimento de industrialização de pequeno porte em algumas cidades do Semiárido e, principalmente, a irrigação nas áreas de água disponível, relativamente limitadas, desde os grandes polos do São Francisco, Açu e Jaguaribe até pequenas roças, aproveitando açudes e rios temporários. Por outro lado, a integração dos mercados determinou o fechamento da maioria das pequenas indústrias do Nordeste (Redwood; Jatobá, 1978).

O comércio e a indústria nos grandes centros urbanos brasileiros vinham causando mudanças nas relações trabalhistas, garantindo mais direitos aos trabalhadores, principalmente depois das leis getulistas das décadas de 1930 e 1940. Porém eles só foram estendidos aos trabalhadores rurais depois da década de 1970 e alteraram os sistemas de produção do Semiárido, reduzindo o número de trabalhadores residentes nas propriedades e participantes em sistemas de produção partilhada, como meeiros, assemelhados e vaqueiros de quarteação, passando a sistemas de assalariamento, com piso salarial e outras garantias cada vez mais cumpridas (Ferreira Irmão; Sampaio, 1985).

Parte desses trabalhadores migrou para a costa e outras regiões do país e parte mudou-se para os núcleos urbanos na região, fazendo com que a população rural no Semiárido fosse inferior à urbana (38% versus 62%) (Instituto Nacional do Semiárido, 2012). Nas áreas urbanas, os serviços públicos e privados expandiram-se vertiginosamente, ainda que muitos de baixa qualidade. A escolarização dos jovens praticamente universalizou-se e o trabalho infantil foi drasticamente reduzido. Pensões, aposentadorias e transferências de renda para os mais pobres (bolsa família) e para os municípios (fundo de participação) elevaram os recursos na região e garantiram o aumento na disponibilidade de bens, amplamente produzidos pela indústria

nacional, para a grande maioria das famílias. Ainda que 3,4 milhões de famílias do Semiárido tenham renda baixa o suficiente para receberem bolsa família (Instituto Nacional do Semiárido, 2012), uma comparação com os bens de famílias nessa faixa de renda na década de 1950 e na atual mostra uma significativa melhoria.

A política de salário mínimo e de transferência de renda e a maior escolaridade elevaram o custo da mão de obra rural, desde a década de 1970 e notadamente já no século XXI. Na faixa a oeste da região semiárida, na Bahia, Piauí e Maranhão, incluída no bioma Cerrado, bem como quase toda a região Centro-Oeste, a partir da década de 1970, extensas áreas antes pouco ocupadas foram transformadas em pecuária melhorada e em agricultura mecanizada, cultivando grãos com alta produtividade. Carnes, laticínios e grãos passaram a ser exportados para todo o Brasil e ainda para o exterior. No Semiárido, a consolidação da infraestrutura de transporte, ainda que ineficiente e com o desmantelamento das ferrovias, e a melhoria na distribuição de bens inundaram o mercado local com esses produtos. A agricultura de sequeiro do Semiárido, principalmente os cultivos de milho e feijão pouco mecanizados e com produtividades médias cinco a dez vezes inferiores, perdeu condições de competir economicamente (Sampaio; Sampaio, 2002). Nas áreas com menor disponibilidade de água, plantar e colher com trabalho assalariado e sem mecanização tornou-se inviável. Nessas áreas, subsistem as roças nas quais a renda é o pagamento da mão de obra própria, muitas vezes sem alternativa de ocupação, incluindo aposentados, donas de casa e desempregados. Nos agrestes e em vales e serras úmidas, a agricultura se mantém, ainda que com baixa rentabilidade, em razão do baixo custo de oportunidade da mão de obra, principalmente dos mais idosos e mulheres. Em algumas dessas áreas, o algodão herbáceo foi incorporado como nova cultura, embora competindo mal com o plantado no oeste nordestino e centro-oeste brasileiro. Apesar da baixa rentabilidade, agravada pela seca, as áreas plantadas com milho e feijão, do Ceará

a Alagoas, predominantemente no Semiárido, oscilaram em torno de 650 mil e 600 mil hectares, respectivamente, entre 2012 e 2016, cerca da metade das áreas de períodos anteriores.

Novas culturas foram introduzidas. Sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] e milheto [*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.], importados da África, substitutos mais resistentes à seca que o milho (Santos et al., 2016), vêm tendo suas áreas de plantio aumentadas, ainda que lentamente porque as produtividades também são baixas. O agave, importado do México na década de 1940, teve um auge de plantio nas décadas seguintes, seguido de declínio provocado pelas fibras sintéticas e hoje só é cultivado em uma pequena área da Bahia. Nenhuma das outras culturas importadas – como jojoba [*Simmondsia chinensis* (Link) C.K. Schneid.] e guaiúle (*Parthenium argentatum* A. Gray) – teve maior êxito, exceto as ligadas à pecuária, discutidas mais adiante.

Nas áreas irrigadas, a agricultura segue bem, voltada principalmente para a produção de frutas com alto valor unitário, como manga, uva e melão. Os grandes polos, ao longo dos vales do Açu e do Jaguaribe e, marcadamente, no do São Francisco, garantiram a prosperidade dos municípios nos quais a irrigação estabeleceu-se com maiores áreas (Sampaio; Sampaio, 2004). Apesar do enorme sucesso, as possibilidades de irrigação são limitadas pela disponibilidade de água. Sua grande expansão deu-se nas décadas de 1970 e 1990, mas não chegou a 1% do Semiárido, abrangendo menos de meio milhão de hectares. Ultimamente, até a área atualmente irrigada tem sido ameaçada pela falta de água, nas épocas de seca, não podendo competir com os usos urbanos e a garantia de geração de energia elétrica, que servem a uma população muito maior e, portanto, com maior poder político. A transposição de águas do São Francisco, destinada quase toda para abastecimento urbano, é um reflexo desse poder. Como um esforço de adaptação, a agricultura tem usado água com maior eficiência, substituindo-se progressivamente os sistemas de irrigação a rego pela microaspersão e pelo gotejamento.

A expansão da população e das pequenas indústrias consumidoras de lenha e o estabelecimento de polos industriais, como o gesso e o siderúrgico, levaram a um consumo de lenha dissociado da abertura de roças, que já vinha decrescendo (Gariglio et al., 2010). Assim, as áreas nos seus entornos, em raios cada vez maiores, foram perdendo a cobertura vegetal nativa. Os derivados de petróleo (gás e óleo industrial) e a eletricidade, mais fáceis de obter e de usar, competem com a lenha, e o equilíbrio entre os usos das fontes de energia desloca-se em função dos preços relativos. Na última década, expandiu-se a captação das energias eólica e solar, que têm enorme potencial na região. É provável que a produção de eletricidade a partir delas exceda o consumo, mantendo um preço relativamente baixo, o que poderia diminuir o consumo de lenha.

Novos produtos da vegetação nativa passaram a ser explorados, com grande impulso durante as duas guerras mundiais (Sampaio et al., 2005). A cera de carnaúba [*Copernicia prunifera* (Mill.) H.E. Moore] e o óleo de oiticica (*Licania rigida* Benth.) viraram produtos de exportação; mas, sem domesticação e cultivo das plantas nativas, suas produções foram gradualmente diminuídas, principalmente a do segundo. A competição com substâncias sintetizadas pela indústria química acelerou o processo. O óleo de licuri (*Syagrus coronata*) tem alguma produção nos solos arenosos que se estendem do norte da Bahia até o meio oeste de Pernambuco. Princípios ativos da indústria cosmética e farmacêutica tiveram suas explorações aumentadas, mas ainda são limitadas e têm valor baixo, assim como as ornamentais, como as sempre-vivas da Chapada Diamantina. Em algumas áreas com maior disponibilidade de água, tem ocorrido a expansão da produção de flores, tanto nativas quanto importadas e tanto para o mercado interno como para exportação. Mas as áreas ocupadas são diminutas.

Com o cercamento das propriedades, viabilizou-se o investimento na melhoria dos rebanhos. Reprodutores das raças indianas de bovinos, já importadas para o Sudeste desde o início

do século XX, começaram a ser cruzados com os rebanhos europeus aclimatados, os “pé-duros”. São raças mais produtivas e acostumadas às temperaturas altas, mas menos resistentes às condições adversas de alimentação que as europeias aclimatadas (Domingues, 1961). Mantidos os mestiços no regime extensivo, passando fome na estação seca, rapidamente adaptaram-se às características dos “pés-duros”; mas despertaram a atenção dos produtores para a necessidade de melhorias na alimentação e no manejo dos rebanhos. O estabelecimento de fazendas voltadas para a venda de reprodutores das raças introduzidas, auferindo maior renda que a obtida com a venda para carne e com a necessidade de melhor tratamento dos animais, levou à melhoria das técnicas de criação, que foi se difundindo na região, ainda que de maneira lenta por causa da menor rentabilidade geral que a auferida pelos vendedores de reprodutores.

A introdução de capins africanos multiplicou-se em pequenas áreas de capineira, principalmente de variedades de capim-elefante (*Pennisetum* spp.), em grande parte das fazendas de criação. A eletrificação permitiu a irrigação de parte delas. Essas variedades são mais voltadas para a manutenção dos reprodutores e animais considerados mais caros e menos adaptados à carência alimentar e para o salvamento dos muito depauperados. Houve ainda o aumento gradual das pastagens plantadas com esses capins africanos, principalmente dos gêneros *Cenchrus* e *Andropogon*. O aumento foi maior nas áreas com maior disponibilidade hídrica, nos limites da transição leste (Agrestes da Paraíba a Sergipe) e no centro e sul da Bahia, onde as chuvas são distribuídas em um período mais longo (5 a 6 meses) que no núcleo do Semiárido e na porção mais setentrional (3 a 4 meses). Cerca de 15% da área das propriedades eram cobertos com pastos plantados no início deste século (Sampaio et al., 2009).

As palmas forrageiras *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. e *Nopalea cochenilifera* (L.) Salm-Dick, introduzidas do México e dos Estados Unidos no começo do século, adaptaram-se bem aos

Agrestes da Paraíba a Alagoas, em áreas do maciço da Borborema, com suas noites relativamente frias, apropriadas a essas plantas com o sistema fotossintético MAC (Menezes et al., 2005). Tornaram-se um esteio das bacias leiteiras, estabelecidas nessas áreas graças ainda à combinação de melhor transporte e eletrificação e à localização até poucas centenas de quilômetros dos grandes centros consumidores, principalmente as capitais estaduais. No final do século XX e início do XXI, a *O. ficus-indica* foi devastada pela introdução da cochonilha-do-carmim (*Dactylopius opuntiae* Cockerell, 1896), mas está se recuperando com a seleção e propagação de variedades resistentes.

O plantio de algaroba [*Prosopis juliflora* (Sw) DC], trazida dos países andinos, foi largamente incentivado como a salvação da pecuária (Cunha; Silva, 2012). Espalhou-se naturalmente, notadamente nos vales com maior disponibilidade de água, até vir a ser considerada uma invasora (Oliveira et al., 2017). Embora produza boa forragem na época seca, o mau uso, com excessivo consumo pelos animais, levou ao aparecimento de doenças e, por isso, sua fama de prejudicial. Muitos antigos entusiastas tentam erradicá-la, mas ainda é bastante usada como forrageira e produtora de lenha e estacas. Nenhuma das outras arbóreas introduzidas, como a leucena [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.], teve maior êxito.

Nas bacias leiteiras, foram introduzidas raças europeias, principalmente gado holandês, cruzadas com as raças já nativizadas e com raças indianas com maior aptidão leiteira, principalmente Gir e Guzerá. Começando nas bacias leiteiras, mas estendendo-se, ainda que devagar, à região toda, foram melhorando as condições sanitárias, com a multiplicação de clínicas veterinárias e de serviços de inseminação artificial e de vacinação. A febre aftosa está controlada em grande parte da região. Porém, a brucelose ainda é um problema.

A disponibilidade de forragem na estação sem chuvas e, principalmente por ocasião das secas, continua um gargalo. Apesar da divulgação das práticas de fenação e ensilagem, pouquíssimas

são as propriedades que fazem conservação de forragem. Sua necessidade ficou patente com a brutal queda de produção e a mortandade dos rebanhos na seca do início da presente década. Atualmente, a população de bovinos é muito alta considerando o problema da disponibilidade de forragem. Do Ceará a Alagoas, onde os rebanhos concentram-se no Semiárido, havia 7,5 milhões de animais em 2017, contrastando com 4,8 milhões em 1970; incluindo Piauí, Sergipe e Bahia, eram 20,7 milhões em 2016 e 7,3 milhões em 1970 (IBGE, 2019). Há, ainda, um número grande, porém decrescente, de equinos (1,1 milhão), asininos (285 mil) e muares (201 mil).

Ovinos e caprinos foram sempre uma pecuária secundária, mais adequada para consumo local, já que não se prestavam às longas marchas aos mercados consumidores. Apenas os “courinhos” eram levados à costa e exportados (Rocha, 2012). Os caprinos, mais adaptados aos locais mais secos que os bovinos, predominaram em poucas áreas, como o núcleo do Semiárido no norte da Bahia e oeste de Pernambuco, dos dois lados do São Francisco, e a área com menos chuva no Brasil, nos Cariris Velhos da Paraíba. No restante do Semiárido, são criados em complementação aos bovinos, principalmente em propriedades pequenas. Recentemente, vêm sendo substituídos por ovinos, de manejo mais fácil. A população de caprinos no Nordeste, quase toda no Semiárido, decresceu de 9,7 milhões, em 2006, a 9,1 milhões, em 2016, enquanto a de ovinos cresceu de 9,7 a 11,7 milhões (Embrapa, 2017). Áreas com predominância de ovinos são poucas, em geral onde a vegetação nativa é mais herbácea que arbustiva, como o Sertão de Inhamuns, no Ceará, o polo integrado Paraíba e Pernambuco e o Sertão Norte, na Bahia. alguma melhoria racial tem sido tentada nas últimas décadas, destacando-se as raças leiteiras de caprinos, mais voltadas à produção de queijos. Apesar delas, manejo e alimentação ainda são inadequados e as produtividades são baixas. A segurança dos rebanhos é um problema, pois caprinos e ovinos, por terem menor porte, são mais fáceis de ser roubados.

Transporte e eletrificação permitiram ainda o estabelecimento e expansão de avicultura, de corte e de postura, em áreas também relativamente próximas das capitais, por vezes sobrepondo-se com as bacias leiteiras. É uma atividade que requer pouco espaço, mas demandante de capital e tecnologia. Ela pode competir com a produção do Centro-Oeste e Sudeste, que têm acesso mais fácil aos grãos que compõem a ração, apenas no mercado de aves resfriadas dos centros consumidores mais próximos. As galinhas de capoeira ainda são criadas em grande número, para consumo próprio e alguma venda nas feiras locais do interior. Os suínos continuam criados em pequena escala, nas propriedades familiares, contudo as criações com tecnologia mais moderna nunca prosperaram, como na região Sul. A população nordestina de suínos até caiu de 8,6 milhões, em 1974, para 5,8 milhões de animais, em 2016.

Um dos destaques deste século tem sido a expansão de cidades de porte médio com razoável oferta de serviços, incluindo hospitais, clínicas, faculdades, supermercados e até shopping centers, o que tem muito contribuído para retenção de parcela da população nessas cidades. Com isso, o crescimento da população total do Semiárido tem apresentado menor queda que nas décadas 1960 e 1970, embora a urbanização tenha se elevado. Em 2011, habitavam o Semiárido 22,6 milhões de pessoas, excluídos Fortaleza e Natal, sendo 62% em áreas urbanas e 93% deles em municípios com menos de 50 mil habitantes (Instituto Nacional do Semiárido, 2012). Do ponto de vista da ocupação do solo, a consequência é sua menor exploração econômica e a expansão de chácaras de fim de semana e até condomínios “rurbanos” no entorno das cidades.

Perspectivas de médio e longo prazo

Perspectivas de médio prazo dependem de premissas sobre alguns aspectos cruciais que moldam o desenvolvimento socioeconômico

e ambiental. Primeiro, a definição de médio e longo prazo é necessariamente arbitrária. Considerando como médio prazo o período até a metade deste século e admitindo-se que não haverá mudanças bruscas imprevistas na sociedade e no ambiente, podem ser feitas algumas projeções gerais. Isso posto, parte-se de três premissas fundamentais: a evolução da população, a globalização e o processo de comércio e as mudanças climáticas.

A população brasileira deve crescer até pouco antes de 2050 e cair ao longo da segunda metade do século. Aumentos populacionais relativamente maiores podem ser esperados nas áreas do oeste nordestino e da região Centro-Oeste, com produção agrícola favorecida no aspecto edafoclimático e ainda com baixa densidade populacional. A população do Semiárido deve seguir a tendência brasileira, acrescida possivelmente de alguma perda por migração e maior despovoamento na área rural, embora a um ritmo menor que o das últimas décadas. No mundo, a população deve continuar crescendo até cerca do final do século, especialmente em alguns países asiáticos e africanos.

A economia nacional deve crescer, embora a um passo relativamente lento, com média de menos de 5% e talvez até menos de 3% de aumento anual do produto interno bruto (PIB). Mesmo modesto, esse aumento da riqueza deve assegurar que o salário mínimo mantenha seu poder aquisitivo relativo atual ou até aumente um pouco. O efeito da universalização do ensino básico e alguma melhoria no nível da educação devem empurrar uma parcela maior da população rural do Semiárido para os empregos urbanos, em geral mais bem remunerados, dentro e fora da região. Mesmo com algum aumento de renda e com o pequeno aumento populacional nas próximas décadas, a demanda por produtos agrícolas pela população do Semiárido não deverá ter aumento expressivo e continuará a ser suprida pela produção das outras regiões. Portanto, a pressão antrópica no Semiárido será menor. No restante do país, a demanda por produtos agrícolas também não deve ter maiores aumentos e o Brasil ainda tem

muita área com potencial de grande aumento em produtividade e, seguramente, continuará a ser um dos grandes exportadores mundiais de alimentos. Já a demanda mundial deverá crescer, tanto pelo aumento populacional quanto pelo maior consumo per capita advindo da melhoria de renda nos países asiáticos e africanos. Essa maior demanda pode elevar os preços agrícolas, caso a produção não a acompanhe.

Mesmo com alguma elevação de demanda e preços, assumindo-se que a globalização, apesar de periodicamente questionada, seja um processo irreversível, a exploração deverá privilegiar as áreas mais favorecidas. Apenas no caso de ocupação total das áreas mais produtivas justifica-se o uso das menos produtivas. Dadas as projeções, a fronteira interna e a possível ocupação de áreas ainda pouco produtivas nos Cerrados parecem ser suficientes para atender as demandas internas e externas. No mundo, a produtividade agrícola deve aumentar, especialmente na África, com o maior investimento por parte dos países grandes consumidores, como a China. Áreas de baixo potencial produtivo, como o Semiárido nordestino, teriam baixa prioridade para investimentos. Nele, apenas as áreas irrigadas, as manchas de exceção e as atividades conduzidas em sistema de confinamento seriam competitivas.

As mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global devem aprofundar a aridez do Nordeste brasileiro, reforçando tudo o que já foi colocado em relação a deslocamentos populacionais e atividade rural. Se o aumento da temperatura se concretizar, o aumento da evaporação dos reservatórios e da evapotranspiração nas terras reduzirá a disponibilidade de água para as populações e para as culturas. Se, além disso, as chuvas diminuírem, o abastecimento urbano ficará mais difícil e menos água sobrar para irrigação, que não deverá ter expansão em área, podendo até ter alguma redução. A produtividade média da agricultura de sequeiro ficará ainda mais baixa e menos competitiva em relação às outras regiões brasileiras. Ainda mais considerando que boa parte da área é de difícil mecanização e demanda muita mão de obra de

plantio e colheita e que a mão de obra terá um valor relativamente alto em relação ao preço dos produtos agrícolas básicos (milho e feijão). A pecuária, que demanda menos mão de obra e é mais resiliente às variações climáticas, será menos afetada, mas terá de equacionar a disponibilidade de forragem nas épocas secas.

Nas áreas mais favoráveis à agricultura, melhores técnicas de produção deverão ser adotadas. Nas áreas irrigadas, o uso da água deve ser otimizado, sistemas de drenagem instalados e medidas tomadas para prevenir salinização. O plantio nos grandes polos será basicamente concentrado em produtos de alto valor unitário, como as frutas já atualmente cultivadas. Adução, incluindo fertirrigação, manejo fitossanitário, agricultura de precisão e tratamentos pós-colheita também deverão ser otimizados.

Nos vales e áreas com maior disponibilidade hídrica e terrenos mecanizáveis, a agricultura de sequeiro seguirá por falta de melhor uso da terra e pela disponibilidade de mão de obra menos qualificada. Adução, incluindo fixação biológica de N, e manejo fitossanitário também devem ser melhorados. Parte dessas áreas será de propriedades de recreio, com trabalho próprio de fim de semana e de lazer ou mesmo trabalho assalariado, ainda que com baixa rentabilidade e até com transferência de renda vinda de atividades urbanas dos proprietários. A produção será mais diversificada, incluindo fruticultura de sequeiro.

Em pequenas áreas disseminadas em múltiplos municípios, com alguma água disponível, será incrementado o plantio de hortaliças para venda local, boa parte aproveitando a demanda por produtos orgânicos e agroecológicos. Elas têm potencial para renda alta por unidade de área, mas demandam muita mão de obra e conhecimentos técnicos especializados. O mercado, local e externo, de produtos com selos de denominação de origem também deverá aumentar e poderá haver nichos exploráveis no Semiárido, para frutos e suas polpas (exemplo: umbu), café e flores em áreas mais altas e ervas finas, além de produtos de origem animal (mel, queijos).

Tirante essas áreas mais favoráveis, a maior parte da produção de culturas anuais de sequeiro, principalmente milho e feijão, deve ser substituída por exploração pecuária ou da vegetação nativa. Elas incluem as áreas de menor precipitação, de encosta e de solos muito rasos. As produtividades já muito baixas e com previsão de redução não pagam a mão de obra empregada, e o desbalanço tende a crescer. As perspectivas da implantação de outras culturas nessas áreas são muito baixas. A limitação hídrica levará sempre a baixa produtividade de biomassa total por unidade de área, e a limitação da mecanização nas áreas de encosta e de solos rasos leva a baixa produtividade da mão de obra. Nessas condições, só culturas com alto valor unitário de biomassa de produto compensariam as baixas produtividades, mas é pouco provável que surjam culturas que atendam a essa condição sem que possam produzir mais biomassa em locais com condições mais favoráveis, o que faria com que fossem mais competitivas nesses locais. Culturas mais adaptadas à deficiência hídrica eventual, como sorgo ou milheto, podem substituir milho por algum tempo; mas elas não serão rentáveis nas áreas mais críticas, já que, em última análise, competem com o milho de alta produtividade do Brasil central. As xerófilas teriam condições de manter alguma produção, mas a única cultura de sucesso na região é a palma forrageira, que pode ter sua área de plantio aumentada. É possível introduzir outras culturas adaptadas à baixa disponibilidade hídrica, mas as tentativas feitas nas últimas décadas (guaiule, jojoba) não tiveram sucesso. As palmas produtoras de frutos poderiam ser uma introdução promissora.

A parte dessas áreas onde a agricultura será abandonada e que será voltada para pecuária poderá ser de pastagens compostas por vegetação nativa, manejada para ser mais aberta pelo fogo ou pelo corte seletivo de arbustivas e arbóreas, ou poderá ser de pastos plantados, onde as condições forem mais favoráveis. Nas propriedades com menos de 10 ha, que são a maioria no Semiárido (Guanziroli et al., 2014), o tamanho não possibilita pecuária extensiva.

Um pequeno número delas pode ter pecuária intensiva, principalmente leiteira, mas terá de buscar forragem fora. É provável que um maior número se especialize em vender forragem, preferencialmente fenada, para consumo na época seca nas propriedades maiores com animais. Caso esse mercado se estabeleça, poderia até incluir a biomassa das culturas anuais que não se desenvolvessem até a produção de grãos por falta de chuvas. Nas áreas propícias, a palma poderia fazer parte desse mercado. É ainda possível que haja uma lenta agregação de propriedades para atingir tamanhos mais compatíveis com a pecuária, pelo menos 100 ha para pecuária extensiva. Embora isso já venha sendo preconizado (Brasil, 2005), as dificuldades de regularização de títulos, a ausência de um mercado de terras estabelecido, a falta de capital disponível para emprego nessa atividade de baixa rentabilidade e a dificuldade de estabelecer políticas de agregação devem fazer com que o avanço seja lento. Provavelmente a agregação seguirá na linha de informalidade que já se observa nas terras partilhadas por herdeiros ausentes, que são trabalhadas por um ou poucos herdeiros que ficam, sem contrato ou arrendamento formal e, em muitos casos, sem pagamento de renda.

A pecuária deverá ter maior diversificação, com especializações em caprinocultura leiteira e produções de queijos finos, ovinos de raças de corte melhoradas de crescimento rápido e abate precoce, criação de cavalos de lazer e produção de aves e ovos de forma mais natural, tipo orgânico ou de capoeira (caipira), para consumo local. A avicultura industrializada deve manter-se em seu nicho de mercado. Parte dessa produção já ocorre e deve ser expandida nas zonas do Cerrado processadoras de soja e milho para ração. No entanto, como atualmente, alguns produtos têm a vantagem do consumo mais fresco, junto aos mercados consumidores mais próximos, reforçando as poucas áreas especializadas na produção de ovos e aves resfriadas.

Parte das áreas abandonadas pela agricultura voltará a ter vegetação nativa, como já vem ocorrendo (Aide et al., 2013). Em muitas, a ve-

getação formará biomassa suficiente para ser vendida como lenha. A maior ou menor exploração dessas áreas para lenha e carvão dependerá da demanda e da legislação vigente. São combustíveis volumosos e de alto custo de transporte, liberam CO₂, requerem muita mão de obra se o corte for seletivo, e, se o corte for raso, mais fácil de mecanizar, tornam as terras mais susceptíveis de degradação, logo mais sujeitas a regras de proibição. O uso depende do preço de outros combustíveis, mas é pouco provável que lenha seja viável se for consumida a distâncias maiores que poucas centenas de quilômetros. O carvão pode viajar mais. A legislação atual dificulta a venda esporádica de lenha de uma área, mas essa pode ser a única opção econômica em muitas propriedades, apesar da baixa renda quando os anos necessários à renovação da biomassa são contabilizados. O corte de algumas dessas vegetações poderá estar ligado à formação de pastagens. Outros usos da vegetação nativa são incertos. Os declínios atuais da oiticica e da carnaúba podem ser revertidos se houver investimento em domesticação e cultivo, mas eles competem com sintéticos da indústria química e não se vê incentivos para essa melhoria. As plantas medicinais podem ter maior exploração, mas ainda têm um mercado limitado e a prospecção de princípios ativos tem sido lenta. Caso houvesse maior interesse por alguma dessas plantas, o passo mais lógico seria sua domesticação e plantio, que provavelmente ocuparia áreas relativamente pequenas.

Haverá espaço para maior atividade de apoio à agricultura e à pecuária, ainda que elas declinem em termos gerais. Nas cidades, os resíduos orgânicos do lixo podem ser transformados em fertilizantes, usados preferencialmente nas pastagens, por questões sanitárias. Restos de cultivo e até culturas específicas, como palma forrageira, podem ser fonte de biomassa para produção de biocombustíveis de primeira e segunda geração. Máquinas e implementos de pequeno porte, para uso em propriedades com áreas restritas, especialmente as de lazer, serão demandados, podendo ser fabricados na região, embora seja mais provável que a grande

circulação de bens facilite sua vinda de fora da região. Serviços de assistência, especialmente veterinária para a pecuária local, deverão ser oferecidos em maior escala, aproveitando a oferta já existente para animais de estimação.

Ênfase é dada nessas perspectivas ao setor rural, considerando o uso do solo e seu manejo agrícola e pecuário. De modo geral, a expansão das cidades de porte médio deve continuar, ocorrendo com gradativa melhoria dos serviços oferecidos e eventualmente explorando bases produtivas locais como artesanato, indústrias locais e outras atividades, ao lado da melhoria geral dos serviços, com destaque para serviços médicos, uma realidade que deve ser reforçada, e educacionais, com expansão de faculdades e universidades nas cidades maiores, além do comércio que se sofisticou *pari passu* com a expansão da renda média. Também é prevista a prestação de serviços em rede, que independem de local de trabalho. Embora muito importantes para a população urbana e para maior fixação da população no interior, seus impactos sobre o uso do solo são modestos e já tratados acima.

Perspectivas de longo prazo são sempre arriscadas. Em geral, são apenas extrapolações das projeções das perspectivas de médio prazo e seriam apenas mais do que já vem sendo descrito. O mais das vezes, com alto grau de incerteza por não contar com os fatos imprevisíveis que sempre surgem e podem causar mudanças radicais. São fatos negativos, como catástrofes naturais ou antrópicas, tipo choque de asteroides ou aquecimento global, degelo e deslocamento de grandes populações ou pandemias e guerras, com redução das populações. Mas podem ser positivos, como as inovações tecnológicas ainda impensadas, no campo das comunicações, do transporte, da automação e robótica, da produção e aproveitamento da energia, da reciclagem e aproveitamento das águas e dos resíduos urbanos, da engenharia genética, da globalização e relações de trabalho, entre outros.

Considerações finais

A região semiárida do Nordeste do Brasil tem temperaturas médias altas ao longo de todo o ano e chuvas sazonais, erráticas e bem abaixo das evapotranspirações potenciais, levando a baixa disponibilidade geral de água. Entretanto, esse quadro geral é matizado por uma ampla variação dentro da região. As projeções indicam que as temperaturas devem aumentar e as chuvas diminuir, reduzindo ainda mais a disponibilidade hídrica. Poucas são as culturas permanentes viáveis nessas condições e, ao longo dos 300 a 400 anos de ocupação europeia, algumas prosperaram por algum tempo (algodão e agave), mas só a palma forrageira tem mostrado claro potencial de expansão. As culturas temporárias, principalmente milho e feijão, ainda ocupam uma proporção significativa da região e da sua mão de obra rural, mas têm baixa produtividade média e não conseguem competir economicamente com os cultivos de outras regiões brasileiras. Área e mão de obra devem decrescer nos locais menos produtivos, mas há diversas formas de melhorar o rendimento nas áreas onde há maior disponibilidade hídrica e que permitam mecanização. A irrigação é uma delas, com grande êxito em alguns polos onde foi estabelecida, mas com potencial de cobrir menos de 2% da área total semiárida. A pecuária extensiva foi o motor da ocupação europeia e tem maior potencial que a agricultura, apesar da renda mais baixa por unidade de área. Pode ainda ser bastante melhorada, notadamente quanto à disponibilidade de forragem na estação sem chuvas e nas grandes secas. No entanto, requer áreas grandes, e a fragmentação fundiária dificulta sua expansão. A produção animal intensiva tem maior viabilidade e há ampla margem para progressos.

No geral, espera-se uma população humana no Semiárido nordestino tendendo a uma lenta redução e tornando-se mais urbana e um declínio da agricultura nas áreas com menor disponibilidade hídrica e menos propícias à mecanização. Portanto, a tendência é de menor pressão antrópica sobre as terras do Semiárido nordesti-

no. O destino dessas terras ainda é incerto, mas abre-se uma oportunidade para maior preservação dos ecossistemas nativos.

Referências

ABREU, C. **Capítulos da história colonial (1500-1800) e os caminhos antigos e o povoamento do Brasil**. Brasília, DF: Universitária de Brasília, 1982. 226 p.

AIDE, T. M.; CLARK, M. L.; GRAU, H. R.; LÓPEZ-CARR, D.; LEVY, M. A.; REDO, D.; BOMILLA-MOHENO, M.; RINER, G.; ANDRADE-NUÑEZ, M. J.; MUÑIZ, M. Deforestation and reforestation of Latin America and the Caribbean (2001-2010). **Biotropica**, v. 45, n. 2, p. 262-271, Mar. 2013. DOI: [10.1111/j.1744-7429.2012.00908.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2012.00908.x).

ALDEN, D. The population of Brazil in the late eighteenth century: a preliminary study. **Hispanic America Historical Review**, v. 43, n. 2, p. 173-205, May 1963. DOI: [10.1215/00182168-43.2.173](https://doi.org/10.1215/00182168-43.2.173).

ALVES, J. **História das secas (séculos XVII a XIX)**. Fortaleza: Instituto do Ceará, 1953. 242 p.

ANDRADE, E. M.; AQUINO, D. N.; CHAVES, L. C. G.; LOPES, F. B. Water as capital and its uses in the Caatinga. In: SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. (ed.). **Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America**. Cam, Switzerland: Springer, 2017. p. 281-302.

ANDRADE, M. C. **A terra e o homem no Nordeste**. São Paulo: Atlas, 1986. 304 p.

ANTONIL, A. J. **Cultura e opulência do Brasil**. Brasília, DF: INL, 1976. 239 p. (Memória Brasileira, ed. original de 1711).

ASSUNÇÃO, L. M.; LIVINGSTONE, I. Desenvolvimento inadequado: construção de açudes e secas no sertão do Nordeste. **Revista Brasileira de Economia**, v. 47, n. 3, p. 425-448, jul./set. 1993.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Plano estratégico de desenvolvimento sustentável do semi-árido (PDSA)**. Brasília, DF, 2005. (Política Nacional de Desenvolvimento Regional – Versão preliminar).

BRUNO, E. S. **História do Brasil: geral e regional [Bahia]**. São Paulo: Cultrix, 1967. 195 p.

CÂMARA, M. A. **Manuel Arruda da Câmara: obras reunidas**. Recife: Fundação de Cultura Cidade de Recife, 1982. 558 p.

CAMPOS, R. T. **Análise socioeconômica da cotonicultura no Estado do Ceará**. 1991. 175 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

CUNHA, L. H.; SILVA, R. A. G. A trajetória da algaroba no semiárido nordestino: dilemas políticos e científicos. **Raízes**, v. 32, n. 1, p. 72-95, jan.-jun. 2012. DOI: [10.37370/raizes.2012.v32.349](https://doi.org/10.37370/raizes.2012.v32.349).

DOMINGUES, O. **O gado nos trópicos**. Rio de Janeiro: Instituto de Zootecnia, 1961. 317 p. (Serie monografias, 4).

DUARTE, R. **A seca nordestina de 1998-1999: da crise econômica à calamidade social**. Recife: Sudene, 1999. 179 p.

ELLIS, J.; GALVIN, K. A. Climate patterns and land-use practices in the dry zones of Africa. **BioScience**, v. 44, n. 5, p. 340-349, May 1994.

EMBRAPA. **Ovinocultura e caprinocultura: conjuntura econômica, aspectos produtivos de 2017 e perspectivas para 2018**. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2017. 21 p. (Boletim do Centro de Inteligência e Mercado de Caprinos e Ovinos, 2).

FERREIRA IRMÃO, J.; SAMPAIO, Y. Estrutura agrária, produção e emprego rural. In: JATOBÁ, J.; SANSON, J. R.; FERREIRA IRMAO J.; SOUZA, A. V.; GUIMARAES NETO, L. **Política de emprego para o Nordeste**. Recife: Massangana, 1985. p. 41-214.

FURTADO, C. **Formação econômica do Brasil**. São Paulo: Editora Nacional, 1967. 261 p.

GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2010. 368 p.

GUANZIROLI, C. E.; SABATTO, A. D.; VIDAL, M. F. Evolução da agricultura familiar nordestina: uma análise comparativa entre os dois censos agropecuários. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 45, suplemento especial, p. 93-106, out./dez. 2014.

IBGE. Pesquisa da Pecuária Municipal. **Efetivo dos rebanhos por tipo de rebanho**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3939>. Acesso em: 3 dec. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. **Sinopse do censo demográfico para o semiárido brasileiro**. Campina Grande, 2012. 103 p.

LINS, R. C. **A bovinocultura no Nordeste: aspectos históricos e econômicos**. Recife: Instituto Joaquim Nabuco de Pesquisas Sociais, 1976. 27 p. (Série Monografias, 6).

LIVRO de vínculo do Morgado da Casa da Torre. Recife: Cepe, 2012. 206 p. (Série Documentos Históricos Municipais).

MENEZES, R. S. C.; SIMÕES, D. A.; SAMPAIO, E. V. S. B. **A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso**. Recife: Editora Universitária, 2005. 258 p.

NUNES, A. M. B. **Dinâmicas de fronteira e a conformação das estruturas social e fundiária nos Sertões da Borborema entre finais de século XVII e início do século XX**. 2017. 445 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

OLIVEIRA, M. T.; SOUZA, A. G. M.; PEREIRA, S.; OLIVEIRA, D. A. S.; FIGUEIREDO-LIMA, K. V.; ARRUDA, E.; SANTOS, M. G. Seasonal variability in physiological and anatomical

traits contributes to invasion success of *Prosopis juliflora* in tropical dry forest. **Tree Physiology**, v. 37, n.3, p. 326-337, Mar. 2017.

PALACIOS, G. **Campesinato e escravidão no Brasil**. Brasília, DF: Ed. da Universidade de Brasília, 2004. 380 p.

PESSENDA, L. C. R.; GOUVEIA, S. E. M.; RIBEIRO, A. S.; OLIVEIRA, P. E.; ARAVENA, R. Late Pleistocene and Holocene vegetation changes in northeastern Brazil determined from carbon isotopes and charcoal records in soils. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 297, n. 3-4, p. 597-608, Nov. 2010. DOI: [10.1016/j.palaeo.2010.09.008](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.09.008).

PINTO, E. **História de uma estrada de ferro do Nordeste**. Rio de Janeiro: José Olympio, 1949. p. 310.

POMPEU SOBRINHO, T. **História das secas**. Fortaleza: Batista Fontenelle, 1953. 539 p.

REDDY, S. J. Climatic classification: the semi-arid tropics and its environment - a review. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 18, n. 8, p. 823-847, ago. 1983.

REDWOOD, J.; JATOBÁ, J. **Desigualdades regionais no desenvolvimento brasileiro**. Recife: Pimes-UFPE, 1978. 241 p.

ROCHA, T. **Delmiro Gouveia, o pioneiro de Paulo Afonso**. Maceió: Imprensa Oficial Graciliano Ramos, 2012. 213 p.

ROLIM, L. C. **Tempo das carnes no Siará grande: dinâmica social, produção e comércio de carnes secas na Vila de Santa Cruz do Aracati (c/1690 -c/1802)**. 2012. 245 f. Dissertação (Mestrado em História) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

SALVADOR, F. V. **História do Brasil: 1500-1627**. Brasília, DF: Melhoramentos, 1975. 437 p. (Memória Brasileira, ed. original, 1889).

SAMPAIO, E. V. B.; SALCEDO, I. H.; ARAÚJO, M. S. B.; MENEZES, R. S. C. **Agricultura sustentável no semi-árido brasileiro**. Recife: Editora Universitária, 2009. 149 p.

SAMPAIO, E. V. S. B. Características e potencialidades. In: GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. **Uso sustentável e conservação dos**

recursos florestais da caatinga. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2010. p. 29-48.

SAMPAIO, E. V. S. B. Overview of the Brazilian caatinga. In: BULLOCK, S. H.; MOONEY, H. A.; MEDINA, E. (ed.). **Seasonally dry tropical forests**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. p. 35-63.

SAMPAIO, E. V. S. B.; FREITAS, A. D. S. Caatinga: descrição geral. In: MOURA, F. B. P.; SILVA, J. V. (org.). **Restauração da Caatinga**. Maceió: Ed. da Edufal, 2017. p. 13-38.

SAMPAIO, E. V. S. B.; MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, Y. S. B.; FREITAS, A. D. S. Sustainable agricultural uses in the Caatinga. In: SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. **Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America**. Cam, Switzerland: Springer, 2017. p. 413-426.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SAMPAIO, Y. **Ensaio sobre a economia da agricultura irrigada**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2004. 235 p.

SAMPAIO, Y. **As secas: mudança nos impactos e análises dos impactos da seca 1998-1999**. Recife: Printer, 2007. 202 p.

SAMPAIO, Y. Uma página esquecida do povoamento do sertão. **Revista de História Municipal**, v. 7, n. 1, p. 125-137, June 1997.

SAMPAIO, Y.; SAMPAIO, E. V. S. B. A economia do semi-árido pernambucano e seu potencial de crescimento. In: TEUCHLER, H.; MOURA, A. S. **Quanto vale a Caatinga?** Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, 2002. 158 p.

SAMPAIO, E. V. S. B.; PAREYN, F. G. C.; FIGUEIRÔA, J. M.; SANTOS JUNIOR, A. G. **Espécies da flora nordestina de importância econômica potencial**. Recife: APNE, 2005. 331 p.

SANTOS, R. D.; NEVES, A. L. A.; PEREIRA, L. G. R.; SOLLENBERGER, L. E.; RODRIGUES, J. A. S.; TABOSA, J. N.; VERNEQUE, R. S.; OLIVEIRA, G. F.; JAYME, D. G.; GONÇALVES, L. C. Agronomic traits, ensilability and nutritive value of five pearl millet cultivars grown in a Brazilian semi-arid region. **The Journal of Agricultural Science**, v. 154, n. 1, p. 165-173, Oct. 2016. DOI: [10.1017/S0021859615000908](https://doi.org/10.1017/S0021859615000908).

Território das secas e da convivência

Trajetórias socioeconômicas e políticas da resistência sertaneja no Semiárido brasileiro

Roberto Marinho Alves da Silva

Introdução

Nesta última década, o Semiárido brasileiro viveu mais uma estiagem prolongada, sendo considerada uma das mais longas, conforme os registros históricos dos períodos de secas (Buriati; Barbosa, 2018). Esse fenômeno climático de irregularidade pluviométrica em uma área de escassez hídrica tornou-se sinônimo e a principal justificativa de crises estruturais socioeconômicas regionais expressas no flagelo, na fome e na miséria da parte mais pobre da população sertaneja. Porém, ao longo da “história das secas”, pode-se identificar tanto os elementos de continuidade quanto de mudanças que vêm ocorrendo no Semiárido brasileiro.

De modo geral, a vulnerabilidade da produção agrícola na região é estrutural e se intensifica durante as longas estiagens, conforme notificou, na década de 1950, o Grupo de Trabalho para o Desenvolvimento do Nordeste – GTDN (Uma política..., 1959), coordenado por Celso Furtado. O GTDN destacou a fragilidade da economia sertaneja e buscava a explicação das calamidades conjunturais das secas nos aspectos estruturais, sociais e econômicos. Da mesma forma, neste início do século XXI, registram-se os prejuízos nas atividades agrícolas e pecuárias, como a perda de rebanhos e a desertificação de sistemas produtivos, sobretudo daqueles que são realizados em pequenas propriedades rurais em regime de economia familiar, com impactos no agravamento da situação de pobreza na região.

A Pesquisa de Informações Básicas Municipais, para o ano de 2017 (IBGE, 2018), identificou que 99,5% dos 1.134 municípios de abrangência do Semiárido¹ foram atingidos pela seca entre 2012 e 2016. Os dados coletados mostram que, em 92% dos municípios, foram registradas perdas financeiras, o que compreende desde perdas ou queda acentuada na produção agrícola (98% dos municípios), decréscimo da produção pecuária (91% dos municípios), desemprego da mão de obra no campo e a consequente diminuição da renda de produtores rurais (IBGE, 2018).

A pesquisa também revelou que, em 74% dos municípios do Semiárido, ocorreram perdas ambientais, sendo que em 40,2% foram indicados casos de início ou ampliação de processos de desertificação e em 24% a concentração de poluentes nos reservatórios hídricos de abastecimento municipal (IBGE, 2018). Sob esses aspectos ambientais, a pesquisa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) reforça as constatações de vários estudos recentes (Sá; Angelotti, 2009; Bezerra, 2016; Tomasella et al., 2018) que destacam a contínua perda de biodiversidade na região semiárida, decorrentes do manejo inadequado do solo e do desmatamento da vegetação, que ampliam os processos de

¹ Número de municípios do Semiárido durante o período de realização da pesquisa pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A partir de novembro 2017, com base na Resolução nº 115, de 23/11/2017, do Conselho Deliberativo da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (Sudene), o Semiárido é composto por 1.262 municípios.

desertificação decorrentes da redução do teor de matéria orgânica no solo, com o agravamento dessa situação nos períodos prolongados de estiagem. Em relação à questão hídrica, o relatório da Agência Nacional de Águas (ANA) de 2017 também destacou problemas relacionados à baixa carga pluviométrica combinada com a exploração excessiva e a poluição de mananciais hídricos no Semiárido, quando grandes reservatórios hídricos² foram “deplecionados drasticamente para atendimento às demandas de água dos diversos usos, encontrando-se em níveis extremamente baixos” (Agência Nacional de Águas, 2017, p. 140).

O relatório do IBGE (2018) indica a permanência de fatores estruturantes das fragilidades no Semiárido brasileiro que se agravam durante as prolongadas estiagens. No entanto, apesar da severidade dos impactos socioeconômicos e ambientais, quando considerados outros indicadores que tradicionalmente são utilizados para constatar e descrever a gravidade das calamidades sociais nas secas, pode-se perceber mudanças naquela realidade. Em sua tese de doutoramento, Luis Cláudio Mattos demonstra que os impactos das secas de 1990 a 1993 e de 2012 a 2016 foram significativamente diferentes entre si do ponto de vista social, destacando que há amplo consenso sobre esta questão em âmbito nacional (Mattos, 2017). Esse e outros estudos (Araújo, 2014; Carvalho, 2014)³ apontam mudanças em fatores que eram historicamente relacionados às calamidades sociais

nas secas, tais como: o aumento nos índices de mortalidade da população local, o esvaziamento demográfico e a ocorrência de saques motivados pelo desespero da fome.

Quanto ao primeiro fator, a Pesquisa Municipal de 2017 (IBGE, 2018) identificou que, em apenas 17% dos municípios do Semiárido, foram citadas perdas humanas relacionadas à crise hídrica no período da seca entre 2012 e 2016, compreendendo vítimas fatais e o êxodo com a saída das pessoas em direção a outros municípios. Ampliando as fontes de informações, verifica-se, por exemplo, que, naqueles anos, não houve uma variação significativa na taxa de mortalidade infantil nos municípios de abrangência do Semiárido, embora permaneça acima das médias regional e nacional, conforme os indicadores disponíveis nos sistemas de informações do Ministério da Saúde⁴. Essa é uma realidade diversa daquela vivenciada, por exemplo, na seca de 1979 e 1983, quando o esvaziamento populacional e a mortandade das pessoas foram tão graves que a obra *O genocídio do Nordeste* denunciou que mais de um milhão de pessoas havia morrido naquele período em razão da omissão e da irresponsabilidade política dos governantes que abandonaram à própria sorte milhares de sertanejos desprovidos de assistência do Estado brasileiro:

Por isso, a última seca não foi mais entendida como uma desgraça natural, nem as mortes encaradas como uma fatalidade. [...] Não foi exatamente a seca quem matou os nordestinos. Houve um genocídio intencional na região, naqueles anos (O genocídio..., 1983, p. 7).

O segundo fator de expressão da calamidade social nos períodos prolongados de seca era o esvaziamento demográfico no Semiárido, quando aumentava a migração para os centros urbanos do Nordeste e para outras regiões do país, conforme o resgate histórico de Villa

² A título de exemplo, em dezembro de 2015, a barragem de Sobradinho, que é responsável por 58,20% da geração de energia na região, estava com apenas 1,77% da sua capacidade de armazenamento. Disponível em: [http://www.ons.org.br/tabela_reservatorios/ conteudo.asp](http://www.ons.org.br/tabela_reservatorios conteudo.asp).

³ A Embrapa também considera esse aspecto como um diferencial em relação a períodos anteriores de secas no Semiárido: “o que houve de diferente dessa seca para outras de proporções semelhantes foi que na última não se observou o êxodo em massa da população de determinadas áreas, ou mesmo os saques em feiras e mercados. Também não houve morte de pessoas por fome e sede”. Embrapa. “Quais foram os efeitos da Seca de 2011/2013”. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-convivencia-com-a-seca/perguntas-e-respostas>.

⁴ Conforme consultas realizadas no Sistema de Informações sobre Mortalidade (SIM) e no Sistema de Informações sobre Nascidos Vivos (Sinasc) do Ministério da Saúde. Disponível em <http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/index.php?area=02>.

(2000). Na atualidade, verifica-se que permanece a saída de pessoas da região, mas em menor número, conforme demonstrado nos estudos recentes de Ojima e Fusco (2015, 2017) sobre fluxos demográficos no Semiárido setentrional. Os autores chamam a atenção para o fenômeno da “migração de retorno”, uma diminuição nas taxas de emigração e um aumento nas taxas de imigração, indicando as novas tendências nos fluxos demográficos na região, com o arrefecimento no processo de perda de população, inclusive em razão do acesso às políticas (Ojima; Fusco, 2015).

Verner (2016, p. 135) também chama a atenção para o aumento da capacidade de resistência nordestina em comparação com as ocorrências de secas anteriores e relaciona esse fenômeno “aos programas de redução de pobreza e de desenvolvimento, cujos sistemas reduziram a migração do sertão”. Essa tendência já podia ser identificada antes do período da última grande seca, quando se verificou que, entre 2000 e 2010, a população global do Semiárido cresceu, embora com um decréscimo na população rural, que passou de 44% para 38%⁵, com um consequente aumento da população urbana de 56% para 62% (IBGE, 2001, 2011). É importante considerar que, na pesquisa do IBGE (2018), a população estimada do Semiárido em 2017 era de 24.198.242 habitantes, o que indica o crescimento da população do Semiárido em 7%, considerando a contagem populacional de 2010 (IBGE, 2011), quando viviam no Semiárido 22.598.318 pessoas.

No que se refere ao terceiro fator de expressão pública da situação de calamidade – a ocorrência de saques motivados pelo desespero da fome –, é possível comparar as consequências das últimas grandes estiagens no Semiárido no século XX com o período atual de seca prolongada no século XXI, evidenciando mudanças nas expressões da questão social na região.

⁵ O Semiárido possui, na área rural, mais que o dobro do percentual da população rural no Brasil, de apenas 15,6%, conforme critérios de medição do IBGE no Censo de 2010 (IBGE, 2011).

Pesquisa realizada sobre os impactos da seca de 1992/1993 no Rio Grande do Norte, por exemplo, constatou a permanência dos dramas que se abatiam sobre a população sertaneja nas longas estiagens, sobretudo da fome como expressão do limiar da sobrevivência biológica. A pesquisa destacou a ocorrência de 77 ameaças de saques, saques e ocupações de órgãos públicos, apenas no ano de 1993 (Silva et al., 1996). Já no período mais recente de seca de 2012 a 2017, não há registro de saques de populações famintas aos armazéns, ao comércio e às feiras nos municípios do Semiárido, conforme constatado em estudos aqui citados (Araújo, 2014; Mattos, 2017).

Chama a atenção o fato de sucessivos anos de seca não terem ocasionado calamidade social tal qual verificada em outros períodos, a exemplo dos acima relatados. Pode-se questionar se aumentou a capacidade de resistência da população sertaneja diante das longas estiagens e quais os fatores que podem ter contribuído para essa mudança. Mais especificamente, é preciso investigar quais as contribuições das políticas públicas para a ampliação da resistência, sobretudo, quando se verifica que, fora os carros-pipas para abastecimento das famílias, não existiram mais “projetos de emergência”, com frentes de trabalho e distribuição de alimentos aos famintos.

Considerando esses aspectos e motivações e, com base em estudos documentais e bibliográficos realizados no âmbito da pesquisa *Políticas públicas de convivência com o Semiárido brasileiro no século XXI*⁶, o presente capítulo busca contribuir para os debates sobre os fatores que fragilizam e os que fortalecem as capacidades de resistência da população sertaneja às estiagens prolongadas, tendo por referência o período entre 2012 e 2017. Parte-se do

⁶ Trata-se da pesquisa registrada sob o código PVE13784-2016, coordenada na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pelo autor do presente capítulo, cujo objetivo é “apreender e analisar as políticas públicas do Governo Federal para a redução de vulnerabilidades sociais, econômicas e ambientais no Semiárido brasileiro nesse início do Século XXI (2000 a 2016)”.

pressuposto de que mudanças recentes nos padrões das políticas públicas no Semiárido fortaleceram a capacidade de resistência da população local e contribuíram para reduzir as expressões da calamidade social nessa última longa estiagem. Consta-se que, desde o final do século XX, houve a ampliação da capacidade de organização e mobilização política de sujeitos sociais (movimentos sociais, instituições de pesquisa, e etc.) que são críticos das políticas de combate à seca e dos processos de modernização conservadora e que propõem uma perspectiva de sustentabilidade do desenvolvimento orientada pela convivência com o Semiárido (Silva, 2008).

Quanto às ações governamentais, percebe-se uma ampliação de investimentos na infraestrutura regional e de expansão das políticas sociais de natureza contínua, sobretudo de seguridade social com a previdência e programas de transferência de renda. Também ocorreram inovações nas políticas de infraestrutura hídrica e nas políticas de fortalecimento da agricultura familiar, tendo por base tecnologias sociais que vinham sendo criadas e expandidas nas últimas décadas. Compreende-se que o fortalecimento das capacidades organizativas e de incidência, com a abertura de canais de participação e diálogo na esfera estatal, possibilitou que parte das políticas públicas tenha sido influenciada pela perspectiva da convivência com o Semiárido.

No entanto, é preciso analisar se essas mudanças são conjunturais ou se os elementos estruturais socioeconômicos e políticos que permanecem ameaçam reduzir a capacidade de resistência da população sertaneja. Deve-se considerar o atual contexto nacional com a adoção de uma agenda de restrições de acesso a direitos sociais e de redução dos investimentos nas políticas públicas sociais e estruturais na região, bem como é preciso ter em consideração os limites relacionados aos impactos das mudanças climáticas globais na área de abrangência do Semiárido.

A longa trajetória de resistência no Semiárido brasileiro

Diversos estudos sobre as características da primeira grande seca do século XXI no Semiárido brasileiro (Araújo, 2014; Carvalho, 2014; Verner, 2016; Mattos, 2017) identificam e combinam diferentes argumentos explicativos da ampliação da capacidade de resistência da população sertaneja, tais como: a expansão do acesso à seguridade social, acompanhada de aumentos reais no salário mínimo; os investimentos estruturais com capacidade de geração de trabalho e aumento da massa salarial; as políticas de infraestrutura hídrica, com a descentralização da malha de captação e distribuição de água; as políticas de fortalecimento da agricultura familiar, com avanços nas ações de convivência, possibilitadas pela ampliação da capacidade de mobilização e de incidência dos movimentos sociais nas políticas públicas.

No entanto, é preciso considerar a longa trajetória de resistência da população sertaneja, dando o devido valor histórico às práticas e conhecimentos de convivência desenvolvidos na relação com a natureza que possibilitaram sobreviver às estruturas opressoras das desigualdades presentes desde a colonização europeia. Esta se fez baseada na máxima exploração da natureza e do trabalho indígena, escravo e das famílias agricultoras empobrecidas do Semiárido. Foi nesse contexto que as secas deixaram de ser apenas ocorrências climáticas e tornaram-se reveladoras da formação de um espaço regional marcado pelas condições de injustiças seculares cometidas contra os sertanejos que dificultavam a resistência nos períodos prolongados de estiagem. É preciso considerar, portanto, as formas de reação e de resistência dos sertanejos, diante das injustiças sociais e das intempéries climáticas.

A partir da análise histórica da formação da civilização sertaneja, Menezes (1970) contradiz as explicações distorcidas que atribuíam aos

fenômenos naturais físicos e climáticos e às características raciais (biológicas) as causas dos problemas socioeconômicos na região. Trata-se de uma crítica ao pensamento conservador que tem como base de argumentação a fragilidade da formação da sociedade brasileira, destacando as heranças do processo civilizatório, com a miscigenação de raças inferiores na constituição de uma massa amorfa, sem capacidade de decidir e orientar seu destino. O autor resgata o valor da contribuição indígena na “etnogenia” da sociedade sertaneja, denunciando o processo de destruição implacável da vida (genocídio) e da cultura (etnocídio) daquelas sociedades primitivas, destruindo os valores vitais das civilizações autóctones e sepultando o modo de vida constituído em milhares de anos de aprendizado com a natureza: “Rompia-se-lhes o ambiente cultural próprio, imiscuindo toda uma série de hábitos, de atitudes, de crenças, que o inutilizavam” (Menezes, 1970, p. 40).

Da mesma forma, o autor contribuiu para desfazer o mito que atribuía às condições climáticas e aos aspectos fisiológicos a explicação dos fenômenos do “misticismo fanático” e da “violência do cangaço”, que constituem formas de reação às opressões e injustiças sociais, marcando a realidade sertaneja (Menezes, 1970). Nesse sentido, existem referências longínquas às formas de resistência sertaneja contra as injustiças, nos casos em que a reação passiva era canalizada para a experimentação de outras formas coletivas de sociabilidade, a exemplo do Arraial de Canudos, no sertão da Bahia, e da Fazenda Caldeirão, no Cariri cearense, onde “implantara-se regime comunitário perfeito no tocante à organização econômica. Todos trabalhavam. Recebiam equitativamente, a ração para o dia seguinte, em cada tarde, após o dia laborioso” (Menezes, 1970, p. 105). Embora subjugadas a uma liderança mítica, as famílias sertanejas encontravam refúgio naqueles arraiais e podiam produzir suas condições de vida: “[...] dos tabuleiros nus espontara a vegetação verde, em contraste impressionante com a muda esterilidade das adjacências, onde prevalecia o tom cinzento e triste da caatinga” (Menezes, 1970, p.

84). Aquelas iniciativas foram destruídas pelas oligarquias sertanejas que não suportavam a ameaça daquele tipo de organização coletiva que subvertia a ordem da dominação estabelecida.

No chamado “complexo econômico sertanejo”, baseado na pecuária, na cotonicultura e na subsistência, consolidado nos séculos XVIII e XIX no Semiárido, é exatamente na produção de subsistência que se encontra a contradição dialética entre fragilidade e resistência. Por um lado, a máxima exploração do trabalho pelos proprietários das terras e pelos intermediários comerciais que promoviam a expropriação do pouco excedente que os agricultores empobrecidos conseguiam gerar, reduzindo a capacidade de enfrentamento dos períodos de secas. Por outro lado, as práticas de resistência decorrentes do acúmulo de conhecimentos sobre os desafios e potencialidades produtivas dos sertões secos, frutos da sensibilidade e de experimentações racionais, expressos nos hábitos de guardar as sementes nativas e mais resistentes às secas anuais para o plantio nos anos seguintes, no manejo de pequenos rebanhos de animais adaptados à Caatinga, entre outras. No entanto, esses esforços eram insuficientes para enfrentar os dramas estruturais da pobreza na região:

Mesmo perfeitamente adaptados à convivência com a rusticidade permanente do clima, os trabalhadores das caatingas não podem conviver com a miséria, o desemprego aviltante, a ronda da fome e o drama familiar profundo criado pelas secas prolongadas (Ab’Saber, 2003, p. 85).

As políticas de combate às secas e aos seus efeitos, institucionalizadas no início do século XX, não conseguiram reverter esse quadro, mas funcionaram como instrumentos de consolidação do complexo econômico sertanejo, viabilizando o acesso à água, por meio da construção de açudes e da abertura de poços, como base fixa para a sua estabilidade. Realmente, os plantios irrigados e de vazante nos açudes construídos com recursos públicos poderiam contribuir para fortalecer a agricultura de subsistência e gerar excedentes de alimentos para o abasteci-

mento local. No entanto, grande parte dos médios e pequenos açudes, assim como dos poços, construídos pelo governo federal para represamento de água e utilização em períodos de seca, servia, sobretudo, para a sustentação dos rebanhos nas propriedades particulares que foram favorecidas com plantio de capim para o gado e de cana-de-açúcar para produção de rapadura e aguardente, em vez de produzirem alimentos para sustentação das famílias pobres.

Para Oliveira (1981), essas benfeitorias eram expressão do poder político alcançado pela oligarquia algodoeiro-pecuária que conseguiu, com as obras hídricas, aumentar seu poder econômico e manter sua base política de sustentação, tendo o controle sobre a água e sobre parte da produção de subsistência realizada pelos seus moradores e meeiros nas várzeas dos açudes. Nesse contexto, a população do Semiárido precisava também ampliar sua capacidade de resistência política à chamada “indústria da seca”, sinônimo de patrimonialismo na política das oligarquias sertanejas, fortemente alicerçada na dominação, pelo uso da força (do coronelismo), e na dependência diante das necessidades vitais (base do clientelismo), canalizando “[...] para os bolsos dos senhores de terras e dos seus apaziguados quase todos os recursos que deviam ser destinados a alimentar, a educar, a ajudar a viver os camponeses da região” (Castro, 1967, p. 194).

No Semiárido, a principal expressão da crise regional na metade do século XX era exatamente o esgotamento das políticas de combate às secas e aos seus efeitos. Havia ocorrido a emergência de pensamentos críticos com interpretações diferenciadas sobre as fragilidades regionais, refletindo um caráter de “síntese da totalidade, abrangendo os aspectos físico-climáticos, culturais, políticos e socioeconômicos” (Silva, 2008, p. 89). Entre outros autores, Castro (2001) enfatizou os fatores estruturais relacionados às epidemias de fome na região: a concentração da terra, a máxima exploração da mão de obra sertaneja, a expropriação dos pequenos produtores e a concentração do poder político, entre outras. Alertava o autor da *Geografia da fome*

que seriam necessárias medidas estruturais que realmente pudessem alterar os alicerces socioeconômicos da região seca do Nordeste, a partir de uma visão da questão na sua complexidade.

Já a questão ecológica no Semiárido foi enfatizada, ainda na década de 1940, na obra de Duque (2001), que analisou as formas inadequadas de ocupação e manejo do solo, da devastação da vegetação de caatinga e de desperdício da água de chuva no sertão semiárido, secularmente reproduzidas e agravadas pelos baixos níveis educacionais e a ausência da participação das famílias sertanejas nas decisões e na execução dos programas de combate aos efeitos das secas. O autor aponta que “[...] a saarização progressiva vai rompendo cada vez mais o equilíbrio entre as associações vegetativas, o ciclo da água, a produção agrícola, a economia e o aspecto social” (Duque, 2001, p. 20).

Do ponto de vista ecológico, ampliar a capacidade da resistência da população sertaneja às secas significava preparar a população para conviver com a semiaridez, tirando dela as vantagens com a adoção de sistemas agrícolas adequados, com base nas plantas resistentes às secas (lavouras xerófilas), na pecuária apropriada à Caatinga, de acordo com as condições do ambiente. Duque (1996, p. 9) afirmava que “Tem-se a impressão de que outrora o conceito de seca era aquele de modificar o ambiente para o homem nele viver melhor. A ecologia está ensinando é que nós devemos preparar a população para viver com a semi-aridez, tirar dela as vantagens [...]”. Para enfrentamento do pauperismo na região, apontou a necessidade de medidas estruturais para garantia do trabalho com acesso à terra, à infraestrutura e ao crédito: “Um lote de terra a quem quer trabalhar, a máquina nas mãos de quem vai lavrar a sua roça, o empréstimo em dinheiro ao que vai limpar o seu algodoal etc.” (Duque, 2001, p. 251).

Um terceiro olhar crítico sobre a crise regional, em meados do século XX, foi formulado sob a influência da teoria do desenvolvimento econômico, concentrando-se na análise da baixa produtividade da economia sertaneja, sobretudo da produção para subsistência que, nos mo-

mentos de crise climática, revelava-se como o elemento mais frágil de toda a estrutura socioeconômica, caracterizada pela concentração da terra: “[...] a estrutura agrária é o principal fator causante da extremada concentração da renda no conjunto da economia” (Furtado, 1984, p. 9). A solução proposta por Celso Furtado para ampliar a capacidade da resistência sertaneja era de transformação progressiva para modernização da economia regional com reformas estruturais e uma mudança na orientação geral da política do governo.

Afirmava Furtado que “[...] não se trata de ‘combater’ as secas, e sim, de conviver com elas, criando uma agropecuária que tenha em conta a especificidade ecológica regional” (Furtado, 1989, p. 44). Para elevar sua produtividade e tornar a economia sertaneja mais resistente aos impactos das secas seria necessário ampliar a produção para o mercado, aumentando a produtividade média, de forma a garantir uma renda estável aos agricultores. “Nosso objetivo era aumentar a resistência da economia do Semi-Árido, de alguma forma incorporar a irregularidade climática ao viver de uma população preparada para enfrentar a seca” (Furtado, 1989, p. 85).

Verifica-se que esses três olhares críticos (das condições estruturais, da questão ecológica e da estagnação econômica) se combinam na análise da realidade, embora as prioridades de intervenção tivessem diferentes direções: o primeiro olhar apontava para reformas estruturais como base das políticas de desenvolvimento regional, o segundo estabelecia prioridade para a produção ecologicamente apropriada e o terceiro tinha como principal proposta a modernização econômica. O documento do GTDN (Uma política..., 1959) buscava, até certo ponto, articular essas três propostas de transformação progressiva da economia sertaneja, promovendo algumas reformas estruturais e elevando sua produtividade com base nos imperativos ecológicos para torná-la mais resistente às secas.

No entanto, foi o aspecto da modernização econômica que passou a orientar as políticas governamentais no Semiárido brasileiro, sobretudo

após o golpe civil militar de 1964 e a consolidação do período ditatorial. A região passou a ser, cada vez mais, tratada como o espaço da geração de energia elétrica com base nas grandes obras de engenharia hidráulica, da moderna agricultura empresarial (pecuária e fruticultura irrigada) destinada aos mercados externos, favorecendo o desenvolvimento de alguns polos agroindustriais que tinham por base um modelo empresarial que deveria agregar maior valor à produção (Silva, 2008).

O fato é que, a exemplo do que ocorreu no plano nacional, o processo de modernização adquiriu uma feição conservadora no Semiárido brasileiro, na qual o Estado buscou viabilizar novas formas de acumulação de capital, preservando as antigas estruturas socioeconômicas e políticas regionais, conforme análise de Bursztyn (1985), agravando ainda mais a concentração da terra e da água com a expulsão do povo do campo para as periferias das cidades, perdendo suas áreas de produção e de vida para a construção dos grandes reservatórios, implantação de perímetros irrigados e instalação das empresas agrícolas que praticaram a grilagem de terras contra os posseiros e pequenos proprietários na região. Naquele contexto, cada estiagem prolongada continuou gerando calamidades, permanecendo as políticas emergenciais de combate aos efeitos das secas.

As desigualdades sociais e regionais também estavam relacionadas à ausência e à limitação de acesso às políticas sociais de previdência, saúde e assistência, que expressavam, conforme Santos (1979), uma forma de “cidadania regulada”, ou seja, um padrão de proteção social que deixava de fora aqueles que não se encontravam inseridos formalmente no mercado de trabalho: “O instrumento jurídico comprovante do contrato entre o Estado e a cidadania regulada é a carteira profissional que se torna, em realidade, mais do que uma evidência trabalhista, uma certidão de nascimento cívico” (Santos, 1979, p. 76). Esse padrão prevaleceu até a década de 1980 como mais um dos fatores de fragilização das capacidades de resistência no Semiárido, pois as relações de trabalho no cam-

po eram majoritariamente informais, fazendo com que a maioria dos trabalhadores sertanejos ficasse alijada do acesso aos direitos de cidadania.

A extensão de benefícios da previdência social aos trabalhadores rurais, por exemplo, ocorreu somente em 1971, com a publicação da Lei Complementar nº 11, de 25 de maio de 1971 (Brasil, 1971), que instituiu o Programa de Assistência ao Trabalhador Rural (Prorural), cuja administração ficou a cargo do Fundo de Assistência e Previdência do Trabalhador Rural (Funrural), concebido ainda em 1963. Mesmo assim, as aposentadorias eram concedidas apenas aos trabalhadores rurais maiores de 70 anos, que recebiam o valor de meio salário mínimo. As mulheres trabalhadoras rurais somente eram beneficiadas diretamente se comprovassem a condição de “chefe de família” ou de assalariada rural e, indiretamente, com a morte do esposo ou companheiro, quando poderia receber somente 70% do valor da aposentadoria do mesmo. Em síntese, o padrão de proteção social até a Constituição de 1988 não contribuía para o fortalecimento das capacidades das famílias sertanejas em resistir às longas estiagens. Permaneciam as míseras remunerações pagas nas frentes de emergência, muitas vezes restritas a um punhado de alimentos.

As bases para construção de formas de resistência no Semiárido começaram a ser construídas no processo de redemocratização do Brasil na década de 1980. O enfraquecimento do regime ditatorial e a atuação dos movimentos sociais, pastorais populares e outras organizações da sociedade civil possibilitaram a retomada das lutas no campo pela realização da reforma agrária, pelo fortalecimento da agricultura familiar (infraestrutura, assistência técnica e crédito) e pela expansão e acesso aos direitos sociais básicos de cidadania (educação, saúde, previdência social, e etc.). Nesse contexto, a Constituição Federal de 1988 criou, garantiu e ampliou direitos civis, políticos e sociais, frutos do processo de mobilização política das forças progressistas, fazendo com que a redução das desigualdades sociais e regionais tenha se tornado um dos ob-

jetivos fundamentais da República Federativa do Brasil: “[...] erradicar a pobreza e a marginalização e reduzir as desigualdades sociais e regionais” (Brasil, 1988, art. 3º, inc. III).

Quanto ao Semiárido, a Constituição de 1988 representou avanços significativos tanto no campo da seguridade social (universalização da saúde, da assistência social e ampliação do acesso à previdência social rural), quanto no tratamento diferenciado que a região deveria receber na política de desenvolvimento regional: na aplicação de recursos destinados à irrigação (Brasil, 1988, art. 42, inc. II) e metade dos recursos destinados à região Nordeste para aplicação em programas de financiamento ao setor produtivo (Brasil, 1988, art. 159, inc. I, alínea c). Posteriormente, o artigo 159 foi regulamentado pela Lei nº 7.827, de 27 de setembro de 1989, que cria o Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste (FNE) e define o Semiárido como “a região natural inserida na área de atuação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – Sudene, definida em portaria daquela Autarquia” (Brasil, 1989, art. 5º, inc. V). Desde então, a nomenclatura do Semiárido passou a substituir legalmente a antiga forma utilizada do “polígono das secas”, mas a sua delimitação oficial continuou a ser objeto de desejo e de disputa pelos municípios para acessar o tratamento diferenciado no FNE e em várias outras políticas públicas.

No entanto, logo após a promulgação da Constituição Federal de 1988, ficou clara a contradição entre os avanços sociais constitucionalmente previstos e as políticas orientadas por estratégias privatizantes e de desmonte do Estado e das suas políticas públicas nos moldes das políticas neoliberais⁷ para ajustar a economia brasileira aos interesses da reestruturação produtiva do capital. Dessa forma, as mudanças

⁷ As políticas neoliberais são orientadas por estratégias privatizantes e de desmonte do Estado e das suas políticas sociais para ajustar a economia aos interesses da reestruturação produtiva do capital em “um regime mundializado sob a égide financeira, consolidado a partir de políticas de liberalização e de desregulamentação” (Silva, 2001, p.157).

nas políticas regionais e sociais que deveriam fortalecer as capacidades da população sertaneja se processaram lentamente e, em alguns momentos, retrocederam, como foi o caso da extinção da Sudene, em 2001, e sua substituição pela Agência de Desenvolvimento do Nordeste (Adene).

Por outro lado, desde o período da redemocratização, no Semiárido estava sendo gestado um processo de organização e mobilização social em torno de novas perspectivas de sustentabilidade do desenvolvimento. Havia ocorrido uma proliferação de movimentos sociais, organizações populares, pastorais e de assessoria que desenvolviam projetos experimentais de tecnologias alternativas e pautavam questões relativas à agroecologia e preservação ambiental no bioma Caatinga, de organização das mulheres, de segurança alimentar e nutricional, dos projetos alternativos comunitários, e etc. Também, as instituições de pesquisa reforçaram ou criaram espaços para construção de alternativas para a região, a exemplo do documento formulado em 1982 sobre o *Semi-árido brasileiro: convivência do homem com a seca* (Embrapa, 1982).

O Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido (CPATSA) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), criado em junho de 1975, passou a desenvolver estudos, pesquisas e experimentações que resultam em um rico acervo de conhecimentos e de tecnologias que possibilitam processos dotados de sustentabilidade no Semiárido. Entre outros, o estudo realizado por Silva (2008) classifica um conjunto significativo de tecnologias sociais (técnicas, instrumentos, metodologias e produtos) desenvolvidas e disseminadas pelas organizações da sociedade civil e pelas instituições públicas de pesquisa e extensão rural, a partir de uma perspectiva de sustentabilidade da convivência com o Semiárido.

O fortalecimento das capacidades organizativas foi o caminho trilhado no final do século XX que possibilitou realizar incidências nas políticas públicas regionais no período seguinte. Os processos de mobilização e articulação política no Semiárido foram motivados pela triste

constatação de que, em plena década de 1990, após três décadas de investimentos na propagada modernização econômica regional, continuaram as crises econômicas e as calamidades sociais nas estiagens prolongadas na região. Na seca de 1992 a 1993, por exemplo, foram alistadas cerca de 2,1 milhões de pessoas nas frentes de emergência, criadas pelo governo federal (Araújo, 1997). No entanto, naquele momento, mais precisamente em março de 1993⁸, houve uma mudança qualitativa na reação dos movimentos sociais, pressionando o governo federal por ações imediatas e cobrando a elaboração de um plano de ações permanentes no Semiárido.

Esse processo de mobilização teve continuidade com a criação do Fórum Nordeste, articulando mais de 300 organizações da sociedade civil na elaboração de uma proposta de ações permanentes para o desenvolvimento do Semiárido brasileiro, centrada no fortalecimento da agricultura familiar, no uso sustentável dos recursos naturais e na democratização das políticas públicas (Ações..., 1993). Além do Fórum regional, foram criados fóruns e articulações estaduais, a exemplo da Articulação do Semiárido Paraibano.

Em 1999, durante a *Terceira Sessão da Conferência das Partes das Nações Unidas da Convenção de Combate à Desertificação (COP 3)*, em Recife, PE, representantes de movimentos sociais, de entidades religiosas e de outras organizações da sociedade civil elaboraram e divulgaram a *Declaração do Semiárido* (Declaração..., 1999). O documento afirma que a convivência com o Semiárido brasileiro é possível com base em duas premissas: a ambiental, que propugnava pela conservação, o uso sustentável e a recomposição ambiental dos recursos naturais; e a socioeconômica, com a quebra do monopólio de

⁸ Em março de 1993, trabalhadores rurais organizados pelo movimento sindical, movimentos sociais no campo, associações, cooperativas e outras organizações da sociedade civil realizaram ato público em Recife e ocuparam a sede da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (Sudene), exigindo providências imediatas diante da situação da seca e um programa de ações permanentes para desenvolvimento do Nordeste semiárido.

acesso à terra, à água e aos meios de produção. Esse é o marco da criação da Articulação do Semiárido Brasileiro (ASA), que mobiliza hoje mais de 3 mil organizações⁹ (sindicatos, associações, cooperativas e outras organizações da sociedade civil) e tem sido portadora das diretrizes de um projeto político no Semiárido, de inversão das prioridades e das estratégias de enfrentamento das problemáticas regionais, recuperando a concepção de desenvolvimento como projeto social, quando “dá prioridade à efetiva melhoria das condições de vida da maioria da população [...] Ela é fruto da realização de um projeto, expressão de uma vontade política” (Furtado, 1984, p. 12).

Incidências políticas e políticas públicas: o que fortalece a capacidade de resistência às secas no Semiárido brasileiro?

As incidências políticas são processos sistemáticos de pressão e de convencimento realizados por movimentos e organizações sociais em espaços públicos, formais e informais, de participação e de controle social na formulação, implantação e avaliação de políticas públicas, conforme assevera Pontual (2017, p. 75): “Ao mesmo tempo em que a incidência em políticas públicas promove a mobilização e a intervenção ativa da população, estimula o desenvolvimento de uma nova cultura política baseada na participação e fortalece o exercício de uma cidadania ativa”.

Nos casos das incidências realizadas pela ASA, existe uma característica complementar que são as experiências e conhecimentos acumulados, por décadas, pelas centenas de organizações que articulam a ação social mobilizadora

com o desenvolvimento e a disseminação de tecnologias sociais orientadas para a convivência com o Semiárido¹⁰. Além de fortalecer as demandas e estratégias de ampliação de acesso a direitos sociais básicos de cidadania (de segurança social, educação, saúde, moradia, água e segurança alimentar e nutricional), corrigindo déficits sociais seculares, e de produção apropriada à realidade territorial, a partir do pressuposto de que o Semiárido é um lugar bom para se viver, a ASA incide nas políticas públicas de forma a inverter o modelo de gestão em que a sociedade indica e reivindica a aplicação do recurso público nas prioridades e ações eficazes para enfrentamento dos problemas, buscando democratizar o Estado.

O Programa de Formação e Mobilização Social para a Convivência com o Semiárido: um milhão de cisternas rurais – P1MC, formulado e, inicialmente, executado pela ASA com a intenção de garantir o acesso de um milhão de famílias a equipamentos de captação e armazenamento de água de chuva para o consumo humano, possui essas características. Da mesma forma, o Programa Uma Terra e Duas Águas – P1+2, desenvolvido como uma segunda estratégia para criar alternativas de estocagem de água das famílias, comunidades rurais e populações tradicionais para as atividades agrícolas e de pequenas criações de animais. Os dois programas passaram a ser apoiados pelo poder público, considerando o potencial deles no enfrentamento das vulnerabilidades socioambientais, com fácil aplicabilidade e potencial de geração de impacto social. Além disso, as metodologias participativas que fazem parte dessas iniciativas potencializam a organização comunitária com a criação de comitês locais e a participação ativa de cada família beneficiada, gerando processos de mobilização desses sujeitos políticos, que passam a compreender e atuar na defesa

⁹ Conforme declarado na página da ASA Brasil, disponível em: <http://www.asabrasil.org.br/sobre-nos/historia#quem-somos>.

¹⁰ Considera-se a convivência com o Semiárido como “uma perspectiva cultural orientadora da promoção do desenvolvimento sustentável, cuja finalidade é a melhoria das condições de vida e a promoção da cidadania, por meio de iniciativas socioeconômicas e tecnológicas apropriadas, compatíveis com a preservação e renovação dos recursos naturais” (Silva, 2008, p. 233).

de uma política pública que rompa com os padrões tradicionais paternalistas, patrimonialistas e clientelistas.

Os dois programas, entre outras iniciativas, são apenas portas de acesso a uma perspectiva mais ampla de incidência nas políticas públicas de desenvolvimento regional que possibilitasse fortalecer as capacidades de resistência sertaneja às secas e dar um salto de qualidade para a convivência com o Semiárido. Desde logo ficou claro que seria um processo de disputa de projetos políticos com a permanência ou continuidade das características das concepções e práticas que predominam historicamente nas políticas públicas na região, historicamente orientadas pelo apelo ao combate à seca e pela crença na modernização econômica, mesmo que incorporando novos elementos discursivos da inclusão social e da sustentabilidade do desenvolvimento: “São sinais evidentes de que as concepções e proposições de políticas públicas para o Semiárido continuam em disputa” (Silva, 2008, p. 82).

Trata-se, portanto, da compreensão de que o exercício do poder político, enquanto capacidade de transformar interesse em decisão, está relacionado tanto ao modo como se estrutura uma sociedade, no que se refere às relações de igualdade e de desigualdade nas esferas sociais e econômicas, quanto ao modo como são criados e permitidos os canais de expressão e de disputa de interesses na esfera política. Especificamente, é necessário analisar a existência de espaços democráticos de decisão relativa à alocação de bens e de recursos públicos e à correlação de forças entre os diversos interesses que orientaram e orientam a intervenção do poder público no Semiárido.

É preciso verificar se ocorreram mudanças nas políticas públicas e se elas contribuíram para fortalecer as capacidades de resistência das famílias sertanejas empobrecidas na região. Vislumbra-se, de início, que os processos de incidência realizados pelos movimentos e organizações da sociedade civil surtiram efeitos nos discursos e concepções de programas federais no Século XXI. Na estiagem de 2001 a 2002,

por exemplo, foi criado o Programa Sertão Cidadão: convívio com o Semiárido e inclusão social, incorporando o discurso da sustentabilidade do desenvolvimento como um de seus referenciais, combinando ações imediatas de atendimento à população com monitoramento de sistemas ecológicos e socioeconômicos, e a disseminação de tecnologias apropriadas de abastecimento hídrico e de produção articuladas às alternativas de inserção no mercado. Já no ano seguinte, com o início do mandato presidencial de Lula (2003–2010), foi criado o Programa Conviver: desenvolvimento sustentável do Semiárido, articulado às estratégias do governo federal no Programa Fome Zero¹¹, que buscava promover a convergência territorial de ações, entre as quais: o cartão alimentação; o garantia safra como seguro agrícola; a compra direta de alimentos produzidos pela agricultura familiar; a disponibilização de linhas de crédito para ações de captação e armazenamento de recursos hídricos e para investimento em culturas forrageiras e de manejo da Caatinga; as ações de educação e de assistência técnica para desenvolvimento de metodologias e tecnologias de convivência, entre outras.

Alguns desses programas e ações prosperaram¹², mas a estratégia de integração interseccional no Semiárido não obteve o mesmo êxito. Apesar dos avanços que comportava, o programa Conviver ficou sob a coordenação do antigo Ministério da Integração Nacional, que manteve o seu foco em projetos de irrigação e de infraestrutura hídrica, sendo alguns dotados de relevância, como as adutoras para abastecimento das cidades no Semiárido. Era o mesmo Ministério responsável por viabilizar o Projeto de Integração do Rio São Francisco com bacias hidrográficas do Nordeste setentrional, uma

¹¹ Programa Fome Zero foi uma estratégia criada em 2003 com o objetivo de garantir o direito humano à alimentação articulando diversas ações e programas do governo federal com outras esferas do governo e organizações da sociedade civil.

¹² Para uma análise de alguns dos programas de apoio à agricultura familiar no Governo Lula, sugere-se a leitura do Boletim *Políticas sociais: acompanhamento e análise* (Políticas..., 2012).

das principais apostas da modernização regional com o mesmo discurso e apelo histórico de que seria a redenção do sertão com a minimização dos efeitos das secas para milhares de pessoas que ali vivem. As polêmicas em torno dos custos econômicos, dos interesses políticos e da sustentabilidade técnica e ambiental do Projeto colocaram em lados opostos representantes do governo federal com aqueles que defendiam a prioridade das estratégias de convivência com o Semiárido com a descentralização e a diversificação das obras hídricas. Essas e outras polêmicas eram sinais evidentes de que as concepções e proposições de alternativas de desenvolvimento no Semiárido estavam em disputa.

Mesmo assim, ocorreram avanços na direção do fortalecimento das capacidades de resistência dos povos do Semiárido com a implantação de milhares de iniciativas descentralizadas de captação e armazenamento de água da chuva, de melhorias tecnológicas, frutos de intercâmbios entre agricultores e pesquisadores, com a diversificação nos sistemas produtivos (animais e vegetais) orientados pela agroecologia e pela pluriatividade em unidades de agricultura familiar, em grande parte, organizadas em formas associativas, de cooperação, de economia solidária e desenvolvimento territorial (Silva, 2008).

Estudo realizado por Perez-Marin et al. (2017), em dez territórios do Semiárido brasileiro¹³, mostrou a ocorrência de mudanças em relação aos indicadores analisados, com melhoria significativa no acesso à infraestrutura de água, diversificação de sistemas de produção animal e vegetal, gestão de bens comuns, integração em espaços políticos organizativos e acesso às políticas públicas. Na mesma direção, o estudo realizado por Mattos (2017, p. 246), em comunidades rurais de três municípios do Semiárido brasileiro, mostra que “as situações enfrentadas pela agricultura familiar na obtenção de seu

sustento e na segurança alimentar tem mudado significativamente, com impactos positivos sobre a qualidade de vida da população local”.

Destaca-se a construção de uma significativa malha de captação, armazenamento e distribuição de água para abastecimento humano e para produção através das adutoras, dos diversos tipos de cisternas, das barragens subterrâneas, dos tanques de pedra, dos barreiros trincheiras e de outras iniciativas de acesso a água pela população do Semiárido. No caso das cisternas para abastecimento doméstico, desde 2003 até agosto de 2015 foram construídos mais de um milhão desses equipamentos na região (Brasil, 2015). Somente no âmbito do Programa P1MC, a ASA contabiliza, em seu “mapa de tecnologias”¹⁴, até julho de 2018, mais de 622 mil cisternas no Semiárido, com capacidade de estocagem de água para consumo humano de 10.212.668 m³, beneficiando diretamente quase 2,5 milhões de pessoas (Mapa..., 2018). Quanto à “segunda água” para produção, viabilizada no âmbito do Programa P1+2, até julho de 2018, a ASA contabilizava 52 mil cisternas-calçadão, 31 mil cisternas-enxurrada, 10 mil barreiros-trincheira, entre outras iniciativas que beneficiavam 101 mil famílias com 409 mil pessoas (Mapa..., 2018).

A Pesquisa de Informações Básicas Municipais (IBGE, 2018) mostra que as ações realizadas nos municípios para evitar ou minimizar os danos causados pela seca ainda estão fortemente concentradas no abastecimento emergencial de água, sobretudo, por meio dos carros-pipas e da construção de poços. O que a pesquisa apresenta como novidade é que a construção de cisternas foi citada em 71% dos 1.134 municípios do Semiárido brasileiro, conforme a Figura 1.

A presença de carros-pipas como forma de abastecimento de água em 88% dos municípios não significa nem um retrocesso e nem que a situ-

¹³ O estudo analisa os impactos das estiagens prolongadas nos 10 territórios pesquisados comparando os períodos de 1973 a 2001, com a predominância de políticas de combate à seca e seus efeitos, e de 2002 a 2016, caracterizado pela implantação de políticas orientadas pelo conceito de convivência com o Semiárido.

¹⁴ O mapa de tecnologias contém a disseminação de dados agregados das ações promovidas e com a participação da Articulação do Semiárido Brasileiro (ASA) e está disponível em <http://www.asabrasil.org.br/mapatecnologias#>

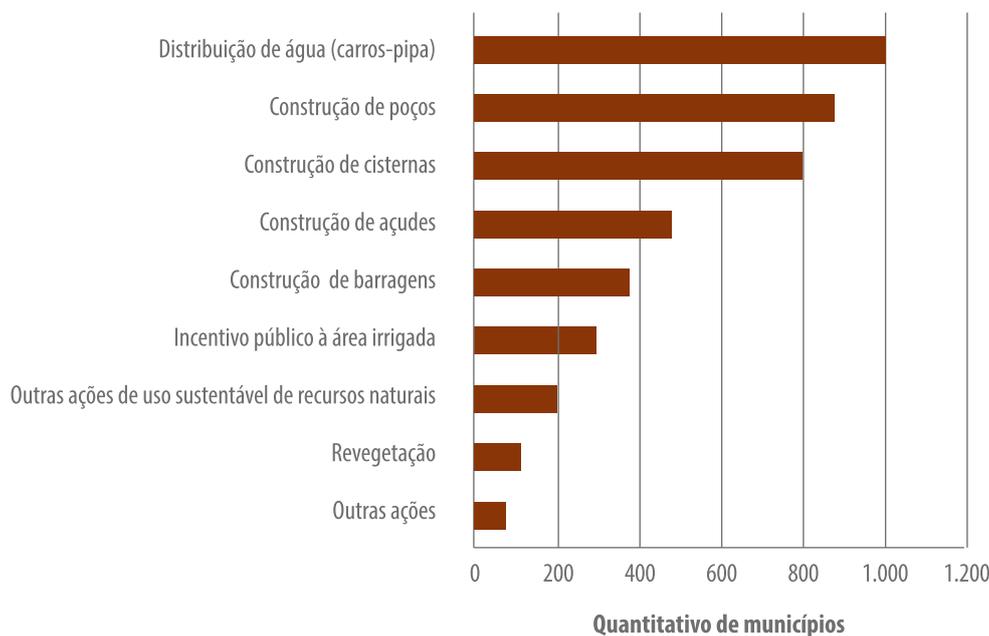


Figura 1. Frequência de ações para evitar ou minimizar os danos causados pela seca em 2012 a 2016 por quantitativo de municípios do Semiárido brasileiro.

Fonte: IBGE (2018).

ação tenha permanecido a mesma. Expressa a gravidade da estiagem prolongada e o déficit histórico na implantação de sistemas de abastecimento e de segurança hídrica no Semiárido rural que atenda, conforme propõe Gnadingler (2015), as cinco necessidades: de água potável para beber, de água para uso comunitário e para a produção agrícola, para abastecimento em situações de emergência e para a conservação e funcionamento dos ecossistemas. Os carros-pipas atendem apenas a primeira necessidade e, a depender da qualidade da água captada em mananciais que estão a céu aberto, pode ser imprópria ao consumo humano. O diferencial é que uma quantidade significativa de famílias tinha cisterna nas suas residências para receber e armazenar a água transportada nos carros-pipas, além de, em alguns casos, abastecer as cisternas de produção e outros reservatórios de água.

Vê-se ainda, na pesquisa, que um quarto dos municípios do Semiárido relatou a existência de iniciativas de incentivo público à agricultura adaptada ao clima e ao solo da região, com sistemas de irrigação e que, em apenas 18% dos municípios, existiam ações de uso sustentável

dos recursos naturais (IBGE, 2018). Ora, essas iniciativas mostram a dificuldade de avançar em políticas públicas com a perspectiva de incentivar e desenvolver práticas produtivas e socioambientais na região. As iniciativas empresariais prosperam aproveitando a infraestrutura hídrica (grandes barragens) já existente ou os aquíferos subterrâneos acessíveis, com água de boa qualidade para implantar os grandes projetos de irrigação, concentrados em alguns espaços territoriais.

No Semiárido, a estratégia de convivência requer o fortalecimento de sistemas produtivos ecologicamente apropriados que combinem a melhoria da atividade produtiva, orientada para a segurança alimentar e nutricional, valorizando a produção para subsistência e com a garantia de acesso a mercados para a produção excedente. Nas últimas décadas, vêm sendo disseminadas centenas de tecnologias com essas perspectivas agroecológicas (Curado et al., 2014; Sambuichi et al., 2017). Na viabilização de escoamento da produção, além das feiras populares tradicionais, estão sendo incentivadas as “feiras agroecológicas” e criados alguns

espaços fixos de comercialização (centrais, lojas, e etc.) com relação direta entre produtor e consumidor. Um grande impulso para o fortalecimento da agricultura familiar no Semiárido foi dado com o Programa de Aquisição de Alimentos (PAA) e o Programa Nacional de Alimentação Escolar (PNAE). Esses programas, nas modalidades executadas diretamente com as famílias de agricultores familiares e suas organizações associativas e de cooperação, possuíam elevada importância e potencial para estruturar sistemas de pequena produção apropriada com mercado garantido e também para incentivar a disseminação de práticas de segurança alimentar e nutricional, com a estocagem de alimentos, forragens para os sistemas de criação animal e de sementes nativas, fortalecendo a infraestrutura produtiva e contribuindo para a autonomia das unidades agrícolas familiares.

Da mesma forma, o Programa de Formação e Mobilização Social para a Convivência com o Semiárido: manejo da agrobiodiversidade – Sementes do Semiárido¹⁵, desenvolvido pela ASA, mobiliza e articula mais de mil “Casas de Sementes” e outras iniciativas de auto-organização comunitária para resgate, manejo, armazenamento e valorização do patrimônio genético com preservação da biodiversidade; ademais contribui para ampliar a autonomia e a sustentabilidade da agricultura familiar e para a segurança e a soberania alimentar e nutricional.

No entanto, não é possível apreender as condições para fortalecimento das capacidades sertanejas de resistência nestas primeiras décadas do século XXI sem considerar a ampliação de outras políticas públicas de abrangência nacional que garantem fontes de renda mínima de caráter continuado. Essas políticas produziram impactos relevantes no Semiárido, considerando que a região concentrava quase um terço das famílias em situação de extrema pobreza do Brasil, conforme o Censo de 2010 do IBGE. O fato é que, entre 2000 e 2010, houve redução da população extremamente pobre do Semiárido

do que passou de 7,1 milhões para 4,9 milhões de pessoas, ou seja, 2,2 milhões de pessoas saíram da extrema pobreza, o que significa uma redução de 12,3% naquela população, superior à média nacional de 5,8% (IBGE, 2001, 2011).

Para explicar a melhoria da renda no Semiárido, destaca-se o acesso das famílias sertanejas às políticas de seguridade social, viabilizando a aposentadoria rural de homens e mulheres com base em um salário mínimo, a ampliação da concessão do Benefício de Prestação Continuada (BPC), previsto na Lei Orgânica da Assistência Social (Lei nº 8.742, de 1993), e a expansão do Programa Bolsa Família (PBF). Parte desses benefícios sociais foi potencializada com os aumentos reais no valor do salário mínimo, ao qual estão vinculados os benefícios da aposentadoria rural e do BPC:

[...] nos últimos dez anos (2003–2013), o salário mínimo no país teve um aumento nominal de 239%, com aumento real (descontada a inflação) de 70,49%, o Nordeste foi diretamente beneficiado (Carvalho, 2014, p. 174).

Apesar dessas constatações, permaneceu ativa, nos meios conservadores da sociedade brasileira, certa “retórica da intransigência”¹⁶, que considera os benefícios previdenciários, as transferências de recursos federais e estaduais e os salários pagos ao funcionalismo público como os componentes de uma “economia sem produção” no Semiárido brasileiro (Gomes, 2001). No entanto, outros estudos e análises (Araújo, 2014; Carvalho, 2014; Mattos, 2017) avaliam positivamente as transferências de renda não ape-

¹⁵ Articulação do Semiárido (ASA). Ações Sementes do Semiárido. Disponível em <http://www.asabrasil.org.br/acoes/sementes-do-semiarido>.

¹⁶ Hirschman (1992) analisou três argumentos reativos que um campo reacionário move, como uma verdadeira guerra ideológica, contra a expansão de direitos de cidadania e das políticas sociais: o argumento da “perversidade”, segundo o qual, as ações públicas, mesmo que bem intencionadas, provocam a exacerbação da situação que se deseja modificar, incentivando, por exemplo, a ociosidade e a acomodação; o argumento da “futilidade”, que ressalta a incapacidade das políticas sociais em promover mudanças nas estruturas da desigualdade social; e o argumento da “ameaça”, que ressalta os elevados e crescentes custos das políticas sociais que podem ser uma grave ameaça à estabilidade econômica.

nas como benefício individual, mas como estratégia de dinamização econômica na região.

Mattos (2017, p. 35) chama a atenção para os efeitos visíveis de “fatores externos na estabilidade dos sistemas da agricultura familiar, proporcionados, sobretudo, pela recuperação do valor do salário-mínimo, da dinamização econômica como um todo e dos programas de transferência de renda”. O autor enfatiza que as transferências de renda ampliam as “entradas econômicas importantes para a família, sendo inclusive utilizadas como investimentos alternativos de reforço à recomposição dos estoques e sistemas produtivos” (Mattos, 2017, p. 251). Da mesma forma, Carvalho (2014, p. 161) chama a atenção para o fato de que mais da metade dos beneficiários da previdência rural reside no Nordeste, sendo a maior parte no Semiárido, ressaltando também “a capilaridade das políticas sociais de transferência de renda, a exemplo do programa Bolsa Família e da Previdência Social que, juntos, cobrem mais de 70% da população sertaneja”.

Para Araújo (2014), a renda que passou a circular nos municípios mais carentes da região teria provocado uma dinamização do consumo em economias locais, ampliando a capacidade de enfrentamento da crise causada pelas perdas na produção no momento das secas prolongadas. A autora cita outras políticas públicas que foram ampliadas nos últimos anos, a exemplo da educação, com a expansão e interiorização das oportunidades de acesso ao ensino técnico e superior, as ações de infraestrutura e de democratização do acesso à energia elétrica, como o Programa Luz para Todos, e à moradia, como o Programa Minha Casa Minha Vida Rural, entre outras. Conforme a autora, a ampliação da rede de proteção social e os projetos de infraestrutura que aumentaram as oportunidades de trabalho remunerado impactaram a melhoria dos indicadores sociais no Semiárido. Por isso, é necessário perceber os impactos diferenciados desses programas de transferência de renda nos espaços regionais:

O Nordeste, por concentrar mais de metade da população muito pobre do país, capta 55% dos recur-

sos desse programa. Nessa região, concentra-se a pobreza rural, e ela tem como endereço principal os pequenos municípios, em especial os do grande espaço semiárido. Nesses municípios, foi interessante observar que, como as bases produtivas locais são muito modestas, o novo e sistemático fluxo de renda não só dava cobertura social aos beneficiados diretos, como também dinamizava as lojas, as farmácias, as padarias, as feiras semanais. (Araújo, 2014, p. 546/547).

É possível perceber a relação entre a segurança social e a estratégia de convivência com o Semiárido, tendo em vista que as ações de transferência de renda de forma continuada, independente de períodos emergenciais de calamidade social, contribuem para melhorar as condições de vida, tornando mais plausível a convivência com o clima e suas irregularidades, além de reduzir o peso político da subordinação e do clientelismo que caracterizavam as políticas emergenciais de distribuição de cestas básicas de alimentos e de alistamento nas frentes de trabalho.

Heranças estruturais e ameaças conjunturais: o que reduz a capacidade de resistência às secas no Semiárido brasileiro?

Conforme foi alertado na introdução deste capítulo, apesar de se reconhecer alguns avanços no tratamento da questão das secas no Semiárido brasileiro, neste início do século XXI, esta é ainda a área territorial nacional que concentra graves indicadores sociais: 22% da população do Semiárido se encontrava em situação de pobreza extrema, conforme o Censo de 2010 (IBGE, 2011). São heranças históricas estruturais que limitam as capacidades da população sertaneja empobrecida de convivência com as irregularidades pluviométricas normais do clima semiárido. Por isso, a análise deve considerar tanto as ações continuadas e estruturais que

possam reverter certas tendências históricas intrarregionais, como as de reprodução das condições de desigualdade social, quanto às oportunidades e ameaças que venham a ocorrer no contexto externo à região.

Pode-se indicar, no primeiro semestre de 2018, a confluência de alguns fatores que precisam ser considerados na análise sobre a possibilidade de avanços ou de retrocessos na direção da convivência com o Semiárido. O primeiro deles é favorável e se refere às notícias de amenização da situação da estiagem prolongada, com a ocorrência, desde o final de 2017 e no início de 2018, de maiores volumes de precipitação de chuvas em quase toda a região, levando aos anúncios apressados e comemorações de que “a seca prolongada acabou”¹⁷. O segundo aspecto é que, salvos novos indicadores socioeconômicos atualizados, não ocorreram mudanças estruturais significativas capazes de reverter algumas das heranças regionais de reprodução da pobreza e das desigualdades. O terceiro aspecto a ser verificado é relacionado aos limites ambientais das regiões de escassez hídrica, sobretudo, considerando os impactos das mudanças climáticas globais na área de abrangência do Semiárido brasileiro. Finalmente, é fundamental para a análise aqui proposta considerar o atual contexto nacional de restrições fiscais e a redução dos investimentos nas políticas públicas sociais e estruturais na região, principalmente, a partir de 2016, com a crise política que fragilizou as instituições democráticas no País, prejudicou ainda mais o desempenho da economia e resultou em uma agenda ainda mais restritiva de acesso a direitos sociais.

Entre as fragilidades estruturais socioeconômicas do Semiárido que vêm sendo historicamente reproduzidas, está a concentração da terra e da água combinada com a exploração e expropriação do trabalho. O Censo Agropecuário de 2006 confirmou a continuidade da concentra-

ção fundiária, em que 51% dos estabelecimentos agropecuários possuem até 5 ha e ocupam apenas 3,4% da área agrícola total, o que significa a existência de um milhão de minifúndios no Semiárido, ou seja, unidades agrícolas cujo tamanho é insuficiente para viabilizar as atividades produtivas adequadas às condições locais, evidenciando a dificuldade de acesso à terra em quantidade suficiente pela agricultura familiar (IBGE, 2009). No outro lado da escala, os estabelecimentos com mais de mil hectares correspondem a 0,3% do total e ocupam 19,3% da área, ou seja, quase seis vezes a área ocupada pela metade dos estabelecimentos agrícolas na região que se caracterizam como minifúndios (IBGE, 2009). Mesmo assim, os estabelecimentos com até 5 ha eram responsáveis por 31% do valor total da produção agrícola do Semiárido, enquanto os estabelecimentos com mais de 200 ha contribuíam apenas com 14% do valor da produção (IBGE, 2009).

Outro fator estrutural é relacionado às heranças históricas da extrema exploração da mão de obra agrícola, caracterizada pelas relações precárias de trabalho de moradores, meeiros, parceiros, diaristas e assalariados, em grande parte sem acesso à terra ou com pouca terra, impedindo a superação das condições de pobreza nas áreas rurais do Semiárido. Para os agricultores familiares, essas condições se agravam ainda mais com os tamanhos exíguos das áreas de trabalho, as limitações físicas dos solos, a baixa disponibilidade hídrica, os baixos índices de escolaridade, o insuficiente acesso à assistência técnica e aos demais meios necessários para produção na região.

Sobre esses aspectos, considera-se relevante o estudo de Aquino et al. (2013) que, tendo por base os dados do Censo Agropecuário de 2006, analisaram as condições de reprodução social dos agricultores familiares no perfil do chamado Grupo “B” do Programa Nacional de Fortale-

¹⁷ Seca prolongada acabou, indica projeção. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/meio-ambiente/ultimas-noticias/redacao/2018/03/03/seca-de-2012-a-2017-no-semiarido-foi-a-mais-longa-da-historia.htm>.

cimento da Agricultura Familiar (Pronaf)¹⁸, ou seja, dos agricultores familiares mais pobres que residiam na região Nordeste e em Minas Gerais¹⁹, conforme a síntese extraída do Sumário Executivo:

[...] 6) O 1,8 milhão de estabelecimentos potencialmente enquadráveis no grupo B do PRONAF localizados na região Nordeste e em Minas Gerais eram dirigidos, em sua maioria, por homens de idade avançada, 20% dos quais com mais de 65 anos, que apresentavam elevado índice de analfabetismo e pouca participação em entidades de classe e cooperativas.

7) A participação dos estabelecimentos do grupo B na distribuição da terra nos estados pesquisados era bastante reduzida. No geral, 69% dos estabelecimentos nordestinos e 59% dos mineiros tinham áreas de terra inferiores a 10 ha. Ademais, o acesso a fontes fixas de água também era precário, pois somente um pequeno número de estabelecimentos contava com poços e cisternas em seu interior.

8) Em 2006, mais de 4,8 milhões de pessoas estavam ocupadas nas pequenas propriedades dos agricultores “pronafricanos” do grupo B no espaço pesquisado. Na região Nordeste, de cada cem pessoas ocupadas na agropecuária em 2006, pelo menos 55 estavam nos estabelecimentos de baixa renda. Em Minas Gerais, por sua vez, o grupo B ocupava 30% do total. Do pessoal ocupado (PO) nos estabelecimentos deste grupo, mais de 90% era membro da própria família do produtor.

9) Do total de membros da família dos agricultores do grupo B, grande parcela não sabia ler nem escrever: 49,89% na região Nordeste e 34,86% em Minas Gerais. Neste sentido, o tema da educação rural emerge como problema social de grande dimensão.

10) Os estabelecimentos do grupo B apresentavam baixo padrão tecnológico. Os dados do Censo Agropecuário 2006 indicaram que havia percentual significativo de produtores localizados nos estados nordestinos (38%) e em Minas Gerais (23%) que

nem ao menos usava energia elétrica em 2006. Além disso, apenas um número muito reduzido utilizava irrigação (3,37% no Nordeste e 6,47% em Minas Gerais) e fazia pousio, ou descanso, de solo (7,81% e 4,45%, respectivamente).

11) Em adição ao acesso precário a tecnologias de produção, destaca-se nas estatísticas censitárias o fato de que um número baixíssimo de agricultores do grupo B recebeu assistência técnica em 2006: 4,24% na região Nordeste e 11,52% em Minas Gerais.

12) As múltiplas carências (de educação, organização, terra, água, tecnologias, assistência técnica e liquidez) dos agricultores do grupo B refletir-se-ão diretamente nos indicadores de produção agropecuária. Uma fração importante do segmento nem ao menos registrou valor da produção (VP) em 2006: 12% no Nordeste e 18% em Minas Gerais. Entre aqueles que tiveram produção, chama atenção o VP médio gerado no transcorrer do ano civil em questão: R\$ 1.118 na região Nordeste e R\$ 1.815 em Minas Gerais.

13) Na região Nordeste, apenas 25% da receita total dos agricultores pobres veio das vendas da produção agrícola, e 75% era originária de outras fontes, com especial destaque para as aposentadorias e as pensões. Em Minas Gerais, os percentuais foram semelhantes à média nordestina. (Aquino et al., 2013, p. 11/12).

Essas são as questões a serem enfrentadas para fortalecer as capacidades de resistência dos agricultores familiares empobrecidos no Semiárido, sobretudo, quando se verificam os limites de sucessão rural na agricultura familiar empobrecida, conforme os dados apresentados na mesma pesquisa de que “apenas uma pequena fração era comandada por jovens com menos de 25 anos: 4,35% no Nordeste e somente 1,77% em Minas Gerais” (Aquino et al., 2013, p. 29). Isso indica um processo de perda de conhecimentos, habilidades e estratégias de convivência que foram sendo experimentados pela agricultura familiar, além de agravar o desabastecimento e a insegurança alimentar na região.

A implantação de grandes projetos agrícolas e hidráulicos nas áreas dinâmicas de expansão do agronegócio, principalmente, da fruticultura irrigada, contribui ainda mais para o agravamento dessa situação estrutural de concentração

¹⁸ O Grupo B do Pronaf é formado pelos agricultores familiares com renda bruta anual familiar – com rebate – de até R\$ 3 mil/ano, sendo no mínimo 30% dessa renda auferida por meio das atividades desenvolvidas no interior do estabelecimento agropecuário.

¹⁹ Mesmo que não se trate de um recorte específico dos municípios do Semiárido, contém os elementos que possibilitam analisar aquela realidade.

e pobreza, tendo em vista a continuidade dos conflitos pela terra e pelo uso das águas represadas nos mananciais hídricos de superfície e nos aquíferos subterrâneos, expulsando agricultores familiares de suas terras, como é o caso da Chapada do Apodi, no Rio Grande do Norte:

O DNOCS desapropriou agricultores/as familiares de suas terras, com o objetivo de entregá-las, juntamente com o usufruto de águas, para o agronegócio. As justificativas para a construção do perímetro irrigado são econômicas, baseadas nas ideias de crescimento econômico, desenvolvimento e progresso. No entanto, o projeto é bastante questionável em termos sociais, ambientais, políticos e inclusive econômicos, tendo em vista que a irrigação no semiárido é extremamente cara. (Pereira, 2016, p. 199).

Para a autora, mais uma vez, o projeto promovido pelo Estado brasileiro no Semiárido, beneficiando as empresas de fruticultura e prejudicando as populações rurais, constitui uma situação de exploração e concentração de uso da água dos aquíferos subterrâneos em um território marcado pela escassez hídrica:

Enquanto a Agrícola Famosa, em setembro de 2015, utilizava em seus campos de produção 172.800.000 litros de água por dia e a WG Fruticultura 3.840.000 litros por dia, cada família do assentamento Santa Agostinha podia pegar no máximo 120 litros de água por dia, distribuída em caminhões-pipa pelo Exército (Pereira, 2016, p. 199/200).

São graves as ameaças ambientais no Semiárido, seja pela exploração e degradação dos seus recursos naturais – água, solo e vegetação – pelos grandes projetos do agro e do hidronegócio, conforme acima exemplificado por Pereira (2016), seja pelos fatores anteriormente citados na pesquisa de Aquino et al. (2013), enfatizando a pouca disponibilidade de áreas agrícolas e o baixo nível tecnológico que induzem a práticas agrícolas e pecuárias predatórias e, consequentemente, à degradação ambiental. O fato é que, de modo geral, a degradação contínua do bioma Caatinga, com séculos de manejo inadequado do solo da água e da vegetação, reduz a capacidade de resistência às mudanças climáticas no Semiárido.

A escassez de água, tanto para o consumo humano quanto para a produção, tem sido agravada pela degradação das nascentes e dos reservatórios naturais, pelo desmatamento da Caatinga, pela poluição e assoreamento dos mananciais e pela evaporação da água acumulada em grandes reservatórios. Da mesma forma, os solos rasos, ondulados e pedregosos também correm riscos de perda da fertilidade, devido às erosões provocadas pelas enxurradas, pelo intenso uso de agrotóxicos, pelas técnicas não apropriadas de manejo do solo e pela retirada da vegetação natural. Recorremos a mais um estudo recente realizado pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), que mostra a grandeza e a gravidade do problema da intensificação da degradação dos solos: entre 2007 e 2016, a área de solos degradados no bioma Caatinga se estendeu por mais de 70 mil quilômetros quadrados (Tomasella et al., 2018), o que equivale a quase metade do estado do Ceará.

A questão ambiental na área de domínio do clima semiárido altamente antropizada torna-se, portanto, ainda mais grave quando os sinais das mudanças climáticas globais são evidentes nos últimos anos, com aumento na temperatura média no planeta e a ocorrência de eventos climáticos extremos com maior frequência e intensidade. Para o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (Contribuição..., 2013), as regiões tropicais no Brasil são as mais vulneráveis aos impactos das mudanças do clima no Século XXI, principalmente, na Amazônia e no Nordeste do Brasil. Quanto ao Semiárido brasileiro, a escassez de água, que já é um enorme problema, tende a agravar-se com o aumento da temperatura, a redução das precipitações pluviométricas e com a exposição dos solos às secas frequentes e prolongadas, além das erosões:

o Semiárido nordestino pode, num clima mais quente no futuro, transformar-se em região árida. Isso pode afetar a agricultura de subsistência regional, a disponibilidade de água e a saúde da população, obrigando as mesmas a migrarem para outras regiões (Contribuição..., 2013, p. 10).

Finalmente, temos que considerar o atual contexto nacional, marcado pela adoção de uma agenda de restrições de acesso a direitos sociais e de forte redução dos investimentos nas políticas públicas sociais e de infraestrutura na região que limita e chega a interromper um processo de fortalecimento das capacidades locais de resistência. O Brasil vive hoje o aprofundamento de mais uma grave crise política, social e econômica que teve início em 2013 e que alcançou seu ápice na ruptura institucional de 2016²⁰. Trata-se de uma forte ofensiva neoliberal orientada por representações de forças econômicas e políticas de setores empresariais, nacional e internacional, com suporte parlamentar, midiático e jurídico que fragilizou o estado democrático de direito e vem promovendo uma verdadeira regressão civilizacional, com a degradação de valores básicos de sociabilidade e de solidariedade e ameaças aos direitos sociais.

O fato é que o governo federal impôs uma mudança estrutural nas finanças públicas, limitando as despesas sociais da educação, saúde, assistência social, habitação, ciência e tecnologia, entre outras, justificando que a origem da crise estava nos gastos sociais e na expansão dos serviços públicos. A Emenda Constitucional 95/2016, que instituiu um “novo regime fiscal da União”, congelou por 20 anos os investimentos sociais, modificando os critérios para cálculo das despesas mínimas que passam a ser corrigidos pela variação da inflação do ano anterior, sem aumento real (Brasil, 2016). Já as despesas financeiras, de pagamento da dívida e dos juros da dívida pública, permanecerão como estão, ou seja, consumindo quase metade do Orçamento Geral da União, conforme as informações disponibilizadas no Portal da Transparência da Controladoria Geral da União para o

²⁰ Considera-se que a crise institucional no Brasil de 2016 alterou as regras de funcionamento das instituições democráticas do estado de direito para promover mudanças no poder político sem a legitimidade da soberania popular, assumindo características de um golpe de estado, conforme a definição dada por Bianchi (2016).

exercício de 2018²¹, primeiro ano de vigência do “novo regime fiscal”.

A agenda do mercado inclui reformas na legislação trabalhista e na previdência social²² que restringem o acesso à seguridade social²³, sobretudo aos mais pobres, desvinculando benefícios sociais do salário mínimo e elevando a idade mínima para aposentadoria, o que pode provocar impactos significativos no Semiárido, levando em consideração a importância da previdência rural em uma região que concentra um terço dos estabelecimentos da agricultura familiar (IBGE, 2009), quase um quarto das pessoas em situação de pobreza extrema e com a menor expectativa de vida em âmbito nacional, conforme o Atlas do Desenvolvimento Humano (Ipea et al., 2014).

As restrições impostas pelo ajuste fiscal estrutural da EC 95/2016 implicam no desmonte de políticas públicas que têm sido estratégicas para a população sertaneja, sobretudo com as restrições nos investimentos em infraestrutura, na fragilização e desmonte da rede de proteção social e no enfraquecimento e extinção de políticas de fortalecimento da agricultura familiar no Semiárido, conforme alguns exemplos aqui já comentados (Seguro Safra, Pronaf, PAA, PNAE, e etc.). Aliás, desde 2015, com as primeiras medidas de ajuste fiscal, começou uma drástica redução orçamentária naquelas políticas públicas, tendo se agravado nos anos seguintes, inclusive com a extinção de órgãos governamentais, a exemplo do Ministério do Desenvolvimento Agrário.

²¹ Considerando o orçamento executado de 2018, no valor de R\$ 3,45 trilhões, as despesas com refinanciamento e serviço da dívida interna chegaram a R\$ 1,62 trilhão, ou seja, 46,9% do total. Dados disponíveis em <http://www.portaltransparencia.gov.br/orcamento?ano=2018>.

²² Em 05 de outubro de 2019, a proposta de reforma da previdência social já havia sido aprovada em dois turnos na Câmara dos Deputados e no primeiro turno no Senado Federal.

²³ Segundo os estudos coordenados por Dweck et al. (2018, p. 27), existem também propostas de restrição do acesso aos benefícios do Programa Bolsa Família, “como a concentração nos 5% mais pobres. Isto significa reduzir o número atual de 14 milhões para 3 milhões de famílias”.

Para 2018, a proposta do executivo para as principais ações do INCRA, do extinto MDA e do MDS voltadas para a reforma agrária e agricultura familiar não chegam a um quarto do valor do exercício de 2017 e era menor que 10% do que o estabelecido para 2015. O enfraquecimento das políticas agrárias e instituições públicas, como o Incra, não somente fortalece o agronegócio patronal em detrimento de um modelo agrícola baseado na agricultura familiar, reforma agrária e comunidades tradicionais, como gera diversas ineficiências e injustiças quanto à produção e o abastecimento doméstico de alimentos, comprometendo a segurança alimentar dos brasileiros. (Dweck et al., 2018, p. 49).

Quanto aos cortes nos financiamentos dos programas e ações de convivência com o Semiárido, a Articulação do Semiárido Brasileiro alertou que a previsão orçamentária do governo federal para a implantação de tecnologias de captação de água da chuva para consumo humano e produção de alimentos em 2018 seria de apenas R\$ 20 milhões, o que possibilitaria implantar apenas 5.453 cisternas: “O que são 5.453 tecnologias diante da necessidade, só no Semiárido, de 350 mil famílias pela cisterna que armazena água para matar a sede e cozinhar? Isto representa um milhão e 750 mil pessoas sem água potável disponível perto de casa para seu consumo”²⁴. O corte orçamentário foi anunciado no final de 2017, no mesmo ano em que o Programa Cisternas – que possibilita o acesso à água para que as famílias rurais do Semiárido brasileiro possam viver na região – recebeu o Prêmio Prata de Política Para o Futuro, concedido pelo World Future Council (WFC), em cooperação com a Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação (UNCCD), reconhecendo a iniciativa promovida pela ASA em parceria com o governo federal como uma das mais eficazes medidas para se combater a desertificação do solo e suas graves consequências sociais.

²⁴ Lata d’água na cabeça até quando? Premiado pela ONU, Programa Cisternas pode ter corte de 92% no orçamento para 2018. Disponível em: http://www.asa-brasil.org.br/noticias?artigo_id=10334.

Considerações finais

A trajetória socioeconômica e geopolítica do Semiárido brasileiro pode ser analisada sob diversos focos e dimensões. Em todas elas, a seca e os seus impactos ambientais, culturais, sociais e econômicos estarão sempre presentes na interpretação da realidade regional. Ou seja, a seca e o enfrentamento da seca são fatores históricos de caracterização e delimitação simbólica do sertão nordestino, do norte seco, do território e do polígono das secas.

Nas narrativas das secas, além da ênfase nas fragilidades naturais e na calamidade social, diversas obras literárias²⁵ deixaram transparecer o componente humano, os traços fisiológicos e comportamentais de homens e de mulheres do sertão, muitas vezes a partir de imagens caricaturadas de rusticidade, de bravura e de beatice religiosa popular que se tornaram estereótipos do que é ser sertanejo, de que “é, antes de tudo, um forte”, como afirmou Euclides da Cunha. No entanto, era praticamente invisível a resistência da maioria da população sertaneja que, durante séculos, teimou em permanecer naquela região, mesmo diante das irregularidades climáticas, dos desgastes decorrentes da máxima exploração da natureza e, particularmente, das formas de exploração sistemática da vida e do trabalho promovida pelas oligarquias dominantes que monopolizavam o acesso à terra, à água e ao

²⁵ “Entre as diversas obras literárias destacam-se: O Sertanejo, de José de Alencar, que inclui uma abordagem ecológica da paisagem e vegetação do Sertão, destacando a importância da carnaúba para o bem-estar do sertanejo; Luzia Homem, de Domingos Olympio, que narra a saga de uma mulher sertaneja que resiste à violência de uma sociedade machista e patriarcal; Os Sertões, de Euclides da Cunha, que retrata a terra e a gente sertaneja, destacando os valores de resistência e bravura; O Quinze, de Raquel de Queiroz, que é uma obra fundamental de denúncia e de desmistificação da complexa realidade socioeconômica sertaneja; Cangaço, de José Lins do Rego, na qual se refletem as influências vindas do Sertão para a Zona da Mata; e Vidas Secas, de Graciliano Ramos, que conta a saga dos retirantes que deixam o Sertão à procura de abrigo e alimentação na região úmida do Nordeste”. (Silva, 2008, p. 86/87).

poder político. A estrutura secular de expropriação da população pobre e de concentração da riqueza é a base da contradição dialética entre resistência e fragilidade, uma constante histórica da questão social no Semiárido.

A adequada compreensão desse processo histórico requer a identificação e a análise dos fatores sociais, políticos, econômicos e ambientais que contribuem para fortalecer ou para fragilizar as capacidades de resistência sertaneja, sobretudo, das famílias agricultoras e camponesas do meio rural. Para isso, além de reconhecer e valorizar as práticas de resistência decorrentes do acúmulo de vivências, experimentações e aprendizados daquela população no trato com a natureza e com as formas de organização social, é preciso considerar os impactos das intervenções governamentais na região. Compreender, por exemplo, os limites das políticas de combate às secas e aos seus efeitos que, embora tenham reproduzido, por mais de um século, as bases estruturais do velho complexo algodoeiro e pecuário, não alteraram as condições de vida e de resistência da maioria da população sertaneja. Da mesma forma, é necessário analisar criticamente as contradições do processo de modernização econômica que adquiriu uma feição conservadora no Semiárido, durante as décadas de 1960 a 1980, viabilizando novas formas de acumulação de capital, mas preservando as antigas estruturas socioeconômicas e políticas regionais.

Uma conclusão possível é de que o fortalecimento das capacidades de resistência das famílias agricultoras e camponesas do meio rural do Semiárido requer novos padrões de políticas públicas nacionais e regionais. Compreende-se que as bases para essa mudança começaram a ser construídas no processo de redemocratização do Brasil, na década de 1980, e que tem suas primeiras conquistas expressas na Constituição de 1988 com avanços na expansão de direitos de cidadania, na concepção da seguridade social (saúde, previdência e assistência), na previsão da participação e do controle social nas políticas públicas e no tratamento diferen-

ciado que o Semiárido deveria receber na política de desenvolvimento regional.

No entanto, na década de 1990, esses avanços foram limitados pelas orientações políticas hegemônicas de retração nos investimentos públicos e de desresponsabilização social do Estado brasileiro. Dessa forma, os processos de incidências nas políticas públicas regionais requereram o fortalecimento da capacidade de organização, mobilização e articulação dos movimentos e organizações sociais em torno de novas perspectivas de sustentabilidade no Semiárido, de construção de um projeto social subjacente à realidade regional orientado pela convivência. O certo é que as políticas públicas regionais passaram a ser disputadas, com alguns avanços na perspectiva da convivência com o Semiárido, mas com a permanência ou continuidade das características das concepções e práticas que predominam historicamente nas políticas públicas de combate à seca e de modernização econômica conservadora na região.

As mudanças nos padrões das políticas públicas para o Semiárido começaram a ser perceptíveis na primeira década do século XXI, quando ocorreram avanços qualitativos em direção ao fortalecimento da capacidade de resistência dos povos do Semiárido com a implantação de iniciativas descentralizadas de captação e armazenamento de água de chuva, com o fortalecimento de sistemas produtivos ecologicamente apropriados orientados para a segurança alimentar e nutricional e com abertura de espaços de acesso a mercados para o excedente. Naquele período foi também montada uma rede de proteção social com políticas públicas e transferência de renda que contribuiu para reverter, pelo menos em parte, tendências históricas de reprodução das desigualdades sociais. Mesmo com a permanência da compreensão negativa da manutenção de uma “economia sem produção”, é preciso considerar os efeitos positivos da melhoria da renda familiar com a dinamização de economias locais, especialmente nos pequenos municípios, com os ingressos das aposentadorias rurais, benefícios assistenciais e programas de renda mínima.

Compreende-se que é exatamente esse somatório de estratégias de convivência com a expansão das políticas de seguridade social que explica o fortalecimento das capacidades de resistência da população local, contribuindo para reduzir as duras expressões da calamidade social nesse período de estiagem prolongada de 2012 a 2017. Mesmo assim, permanecem grandes desafios para avançar em direção à convivência com o Semiárido, tendo em consideração que não ocorreram mudanças estruturais significativas capazes de reverter heranças regionais de reprodução da pobreza e das desigualdades sociais. Da mesma forma, os alertas sobre os impactos das mudanças climáticas e o avanço nos processos de desertificação representam novos e enormes desafios para a estratégia da sustentabilidade na região. Os fatores conjunturais também são limitadores, considerando o atual contexto nacional de redução dos investimentos nas políticas sociais e de infraestrutura, desde 2015, com alterações para pior dos indicadores sociais regionais.

Pode-se concluir que, no atual período, o fortalecimento da resistência da população sertaneja depende, principalmente, de processos políticos de mobilização social (locais, regionais e nacionais) capazes de garantir a manutenção de direitos de cidadania, o que implica na capacidade de recuperação das instituições do estado democrático de direito. Com essa compreensão, desde 2015, os movimentos sociais no Semiárido adotaram uma postura crítica e de pressão com base no lema: “nenhum direito a menos no Semiárido!”

No entanto, o salto de qualidade, passando da resistência sertaneja para a convivência com o Semiárido, requer processos estratégicos mais aprofundados de enfrentamento e superação das estruturas de reprodução das desigualdades socioeconômicas e políticas e de adoção de sistemas de produção e de manejo ambiental orientados para a sustentabilidade da convivência, enquanto um horizonte de futuro possível no Semiárido brasileiro.

Referências

- AB’SÁBER, A. **Os domínios de natureza no Brasil:** potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê, 2003. 159 p.
- AÇÕES permanentes para o desenvolvimento do Nordeste semi-árido brasileiro: propostas da sociedade civil. Recife: Contag, 1993. 40 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017:** relatório pleno. Brasília, DF, 2017.
- AQUINO, J. R.; SHENEIDER, S.; XAVIER, L. **Caracterização do público potencial do PRONAF “B” na região Nordeste e no estado de Minas Gerais:** uma análise baseada nos dados do Censo Agropecuário 2006 - relatório de pesquisa. Brasília, DF: Ipea, 2013. 62 p. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/130319_relatorio_caracterizacao_publico.pdf. Acesso em: 15 out. 2019.
- ARAÚJO, T. B. Nordeste: desenvolvimento recente e perspectivas. In: GUIMARÃES, P. F.; AGUIAR, R. A. de; LASTRES, H. M. M.; SILVA, M. M. da. **Um olhar territorial para o desenvolvimento:** Nordeste. Rio de Janeiro: BNDES, 2014. p. 540-560. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2801>. Acesso em: 22 ago. 2019.
- ARAÚJO, T. B. Herança de diferenciação e futuro de fragmentação. **Estudos Avançados**, v. 11, n. 29, p. 7-36, Jan./Apr. 1997. DOI: [10.1590/S0103-40141997000100002](https://doi.org/10.1590/S0103-40141997000100002).
- BEZERRA, F. G. S. **Contribuição de fatores socioeconômicos, biofísicos e da agropecuária à degradação da cobertura vegetal como “proxy” da desertificação no semiárido do nordeste do Brasil.** 2016. 207 f. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- BIANCHI, A. O que é um golpe de Estado. **Blog Junho**, 26 mar. 2016. Disponível em: www.blogjunho.com.br/o-que-e-um-golpe-de-estado. Acesso em: 23 de jul. 2018.
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil.** Brasília, DF: Senado Federal, 1988. 292 p.
- BRASIL. Emenda Constitucional nº 95, de 15 de dezembro de 2016. Altera o Ato das Disposições Constitucionais Transitórias, para instituir o Novo Regime Fiscal, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 16 dez. 2016. p. 2. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Emendas/Emc/emc95.htm. Acesso em: 25 abr. 2017.
- BRASIL. Lei Complementar nº 11, de 25 de maio de 1971. Institui o Programa de Assistência ao Trabalhador Rural, e dá outras providências. **Diário Oficial da República**

- Federativa do Brasil**, 26 nov. 1971. Seção 1, p. 9641. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp11.htm#:~:text=LEI%20COMPLEMENTAR%20N%C2%BA%2011%2C%20DE%2025%20DE%20MAIO%20DE%201971&text=Institui%20o%20Programa%20de%20Assist%C3%Aancia,Art. Acesso em: 18 mar. 2021.
- BRASIL. Lei nº 7.827, de 27 de setembro de 1989. Regulamenta o art. 159, inciso I, alínea c, da Constituição Federal, institui o Fundo Constitucional de Financiamento do Norte - FNO, o Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste - FNE e o Fundo Constitucional de Financiamento do Centro-Oeste - FCO, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 28 set. 1989. Seção 1, p. 17361. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1989/lei-7827-27-setembro-1989-365476-publicacaooriginal-1-pl.html>. Acesso em: 24 abr. 2018.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome. **Tecnologia simples de captação de água da chuva no Semiárido pode ajudar outras regiões**. Disponível em: <http://mds.gov.br/area-de-imprensa/noticias/2015/fevereiro/tecnologia-simples-de-captacao-de-agua-da-chuva-no-semiarido-pode-ajudar-outras-regioes>. Acesso em: 25 jun. 2015.
- BURITI, C. O.; BARBOSA, H. A. **Um século de secas: porque as políticas hídricas não transformaram o semiárido brasileiro?** Lisboa: Chiado Books, 2018. 431 p.
- BURSZTYN, M. **O poder dos donos: planejamento e clientelismo no Nordeste**. 2. ed. Petrópolis: Vozes, 1985. 265 p.
- CARVALHO, C. P. O. O novo padrão de crescimento do Nordeste Semiárido. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 45, n. 3, p. 160-184, jul./set. 2014. DOI: [10.28998/contegeo.v1i2.6082](https://doi.org/10.28998/contegeo.v1i2.6082).
- CASTRO, J. **Geografia da fome: o dilema brasileiro, pão ou aço**. 14. ed. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2001. 332 p.
- CASTRO, J. **Sete palmas de terra e um caixão: ensaio sobre o Nordeste, área explosiva**. São Paulo: Brasiliense, 1967. 224 p.
- CONTRIBUIÇÃO do Grupo de Trabalho 2 ao primeiro relatório de avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas: sumário executivo. Rio de Janeiro, 2013. 28 p.
- CURADO, F. F.; SANTOS, A. S.; OLIVEIRA, M. J. Sistematização de experiências agroecológicas no território Semiárido Nordeste II, Bahia. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 31, n. 2, p. 349-380, 2014.
- DECLARAÇÃO do Semiárido. Recife, 1999. Disponível em: http://www.asabrazil.org.br/images/UserFiles/File/DECLARACAO_DO_SEMI-ARIDO.pdf. Acesso em: 14 set. 2019.
- DUQUE, J. G. **Alguns aspectos da ecologia do Nordeste e as lavouras xerófilas**. Mossoró: Esam, 1996. (Coleção Mossoroense. Série B, 1352).
- DUQUE, J. G. **Solo e água no polígono das secas**. 6. ed. Mossoró: Esam, 2001. 334 p.
- DWECK, E.; OLIVEIRA, A. L. M.; ROSSI, P. (coord.). **Austeridade e retrocesso: impactos sociais da política fiscal no Brasil**. São Paulo: Brasil Debate: Fundação Friedrich Ebert, 2018. 66 p. Disponível em: http://brasildebate.com.br/wp-content/uploads/DOC-AUSTERIDADE_doc3-_L9.pdf. Acesso em: 7 ago. 2018.
- EMBRAPA. **Quais foram os efeitos da Seca de 2011/2013**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-convivencia-com-a-seca/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 5 out. 2018.
- EMBRAPA. **Semi-árido brasileiro: convivência do homem com a seca. Implantação de sistemas de exploração de propriedades agrícolas: uma proposta de ação**. Brasília, DF, 1982. 239 p.
- FURTADO, C. **A fantasia desfeita**. 3. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1989.
- FURTADO, C. O Nordeste: reflexões sobre uma política alternativa de desenvolvimento. **Revista de Economia Política**, v. 4, n. 3, p. 5-14, jul./set. 1984.
- GNADLINGER, J. Água de chuva no manejo integrado dos recursos hídricos em localidades semiáridas: aspectos históricos, biofísicos, técnicos, econômicos e sociopolíticos. Campina Grande: ABCMAC: Insa, 2015. 440 p.
- GOMES, G. M. **Velhas secas em novos sertões: continuidade e mudanças na economia do semi-árido e dos cerrados nordestino**. Brasília, DF: Ipea, 2001. 294 p.
- HIRSCHMAN, A. O. **A retórica da intransigência: perversidade, futilidade, ameaça**. São Paulo: Companhia das Letras, 1992.
- IBGE. **Censo Agropecuário 2006**. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro>. Acesso em: 28 abr. 2018.
- IBGE. **Censo demográfico 2000: amostra - migração e deslocamento**. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-demografico/demografico-2000/inicial>. Acesso em: 28 abr. 2018.
- IBGE. **Censo demográfico 2010: características da população e dos domicílios: resultados do universo**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-demografico/demografico-2010>. Acesso em: 28 abr. 2018.
- IBGE. **Pesquisa de Informações Básicas Municipais - 2017**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://metadados.ibge.gov.br/consulta/estatisticos/operacoes-estatisticas/PM>. Acesso em: 28 abr. 2018.

- IPEA. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**. Disponível em: <http://atlasbrasil.org.br/2013/pt>. Acesso em: 23 abr. 2014.
- MAPA das tecnologias. Disponível em: <http://www.asabrazil.org.br/mapatecnologias/#>. Acesso em: 23 de jul. 2018.
- MATTOS, L. C. M. **Um tempo entre secas**: superação de calamidades sociais provocadas pela seca através das ações em defesa da convivência com o semiárido. 2017. 274 f. Tese (Doutorado em Ciências Sociais) – Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MENEZES, D. **O outro Nordeste**: ensaio sobre a formação social e política do Nordeste da “Civilização do Couro” e suas implicações históricas nos problemas gerais. 2. ed. Rio de Janeiro: Artenova, 1970.
- O GENOCÍDIO do Nordeste (1979-1983). São Paulo: Hucitec, 1983. 147 p.
- OJIMA, R.; FUSCO, W. Migração no Semiárido Setentrional: dinâmica recente, retorno e políticas sociais. **Mediações – Revista de Ciências Sociais**, v. 22, n. 1, p. 325-349, 2017. DOI: [10.5433/2176-6665.2017v22n1p325](https://doi.org/10.5433/2176-6665.2017v22n1p325).
- OJIMA, R.; FUSCO, W. (org.). **Migrações Nordestinas no Século 21**: um panorama recente. São Paulo: Edgard Blücher, 2015. 202 p.
- OLIVEIRA, F. **Elegia para uma re(li)gião**: Sudene, Nordeste, planejamento e conflito de classes. 6. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1981. 147 p.
- PEREIRA, M. C. G. **Água e convivência com o semiárido: múltiplas águas, distribuições e realidades**. 2016. 234 f. Tese (Doutorado em Administração Pública e Governo) – Fundação Getúlio Vargas, Escola de Administração de Empresas, São Paulo.
- PEREZ-MARIN, A. M.; ROGÉ, P.; ALTIERI, M. A.; FORERO, L. F. U.; SILVEIRA, L.; OLIVEIRA, V. M.; DOMINGUES-LEIVA, B. E. Agroecological and social transformations for coexistence with semi-aridity in Brazil. **Sustainability**, v. 9, n. 6, June 2017. DOI: [10.3390/su9060990](https://doi.org/10.3390/su9060990).
- POLÍTICAS sociais: acompanhamento e análise. Rio de Janeiro, v. 1, n. 20, jun. 2012. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=15011&Itemid=9. Acesso em: 28 abr. 2018.
- PONTUAL, P. C. Educação popular e incidência em políticas públicas. **Revista e-Curriculum**, v. 15, n. 1, p. 62-81, jan./mar. 2017. DOI: [10.23925/1809-3876.2017v15i1p62-81](https://doi.org/10.23925/1809-3876.2017v15i1p62-81).
- SÁ, I. B.; ANGELOTTI, F. Degradação ambiental e desertificação no Semi-Árido brasileiro. In: ANGELOTTI, F.; SÁ, I. B.; MENEZES, E. A.; PELLEGRINO, G. Q. (ed.). **Mudanças climáticas e desertificação no Semi-Árido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2009. p. 53-76.
- SAMBUICHI, R. H. R.; MOURA, I. F.; MATTOS, L. M.; ÁVILA, M. L.; SPÍNOLA, P. A. C.; SILVA, A. P. M. S. (org.). **A política nacional de agroecologia e produção orgânica no Brasil**: uma trajetória de luta pelo desenvolvimento rural sustentável. Brasília, DF: Ipea, 2017. 463 p.
- SANTOS, W. G. **Cidadania e justiça**: a política social na ordem brasileira. Rio de Janeiro: Campos, 1979. 89 p.
- SILVA, R. B. As raízes do neoliberalismo. **Revista FAEBA**, v. 15, p. 157-168, 2001.
- SILVA, R. M. A. **Entre o combate à seca e a convivência com o semi-árido**: transições paradigmáticas e sustentabilidade do desenvolvimento. Fortaleza: BNB, 2008. 275 p.
- SILVA, R. M. A.; FORMIGA, M. C. C.; CUNHA, M. H. S. Trabalhadores rurais na seca 1992/1993 no RN: políticas públicas e luta pela sobrevivência. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 10., 1996, Caxambu. **Anais [...]** Belo Horizonte: Abep, 1996. p. 337-365.
- TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; SANTANA, M. O.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000-2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, Dec. 2018. DOI: [10.1016/j.jag.2018.06.012](https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012).
- UMA POLÍTICA de desenvolvimento econômico para o Nordeste. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1959. 97 p.
- VERNER, D. Vozes do povo: impactos socioeconômicos da seca no Nordeste do Brasil. In: NYS, E. D.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. (org.). **Secas no Brasil**: política e gestão proativas. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; Banco Mundial, 2016. p. 135-166.
- VILLA, M. A. **Vida e morte no sertão**: história das secas no Nordeste nos séculos XIX e XX. São Paulo: Ática, 2000. 269 p.

O clima no Semiárido do Nordeste do Brasil

Tendências atuais e futuras

Jose Antonio Marengo

Introdução

As terras secas, como as regiões áridas e semi-áridas, que abrigam mais de 38% da população mundial, são muito sensíveis às mudanças climáticas e às atividades humanas (Huang et al., 2017). Nessas regiões, o fenômeno das secas, período de longas estiagens, recorrentes no tempo, afeta mais pessoas do que qualquer outro risco ambiental, devido à sua escala de abrangência e longa duração. No Brasil, uma das regiões mais vulneráveis aos extremos do clima e à mudança climática é a semiárida do Nordeste. Ressalte-se, porém, que, nessa região, a seca não é somente um evento natural que traz consequências negativas para a sua população vulnerável, mas um fenômeno de dimensões econômicas, sociais e políticas secularmente presentes na vida dessa população. (Martins et al., 2015, 2018; Marengo et al., 2016, 2018, 2019; Brito et al., 2017; Alvalá et al., 2019).

A distribuição e a sazonalidade das chuvas no Semiárido do Nordeste do Brasil não é uniforme, e cada área tem sua especificidade. No norte, por exemplo, os meses de fevereiro a maio (FMAM) são considerados estação chuvosa. Nas faixas centro-sul e oeste, seu período chuvoso é de dezembro a fevereiro. No lado leste, as chuvas geralmente vão de maio a agosto (Marengo et al., 2019).

Há registros de que, desde 1605, a região já enfrentou mais de cinco dezenas de períodos de seca, algumas de gravidade tão elevada que

aceleraram o êxodo rural. Esses fatos foram retratados, inclusive, em romances da literatura brasileira, como em *O Quinze*, o primeiro romance da escritora modernista Rachel de Queiroz (Queiroz, 1989). Nessa obra, regionalista e de cunho social, cujo tema central é a seca de 1915, que assolou o Nordeste do país, há um trecho que descreve bem a reação da personagem diante do cenário causado pela seca: [...] Teve um súbito desejo de emigrar, de fugir, de viver numa terra melhor, onde a vida fosse mais fácil e os desejos não custassem sangue [...]. (Queiroz, 1989, p. 47).

Outra obra literária que retrata a relação do sertanejo com os impactos da seca é *Os Sertões*, de Euclides da Cunha (Cunha, 1989, p. 81), como se percebe no trecho a seguir:

Na plenitude das secas são positivamente o deserto. Mas quando estas não se prolongam ao ponto de originarem penosíssimos êxodos, o homem luta como as árvores, com as reservas armazenadas nos dias de abundância e, neste combate feroz, anônimo, terrivelmente obscuro, afogado na solidão das chapadas, a natureza não o abandona de todo. Ampara-o muito além das horas de desesperança, que acompanham o esgotamento das últimas cacimbas.

Neste capítulo, avalia-se detalhadamente a tendência climática e o risco de estresse hídrico e da seca para a região semiárida brasileira, tanto para o clima atual quanto para o clima futuro. Para isso faz-se uma revisão de estudos que mostram o estado da arte sobre as tendências do clima e extremos de precipitação na região,

assim como das mudanças na temperatura, precipitação, balanço hídrico, entre outras variáveis climáticas de relevância para os impactos que a seca provoca na vegetação dessa região em escala regional no futuro.

Histórico das secas no Nordeste

Por um lado, há forte relação entre o fenômeno El Niño e a ocorrência de secas mais intensas. Assim, nos eventos históricos de seca no Nordeste, registrados desde 1583 até os dias atuais (Tabela 1), as mais intensas ocorridas nos anos de fortes El Niño foram: 1877–1879, 1897–1899, 1902–1903, 1919, 1951–1953, 1958, 1966, 1982–1983, 1986–1987, 1997–1998, 2010 e 2015–2016. No entanto, entre as mais recentes (1992, 1998, 2002, 2010 e 2012–2016), apenas

Tabela 1. Registro histórico de anos de ocorrência de secas no Nordeste do Brasil desde o século XVI até os dias atuais.⁽¹⁾

| Século | Anos de seca |
|--------|--|
| XVI | 1583 e 1587 |
| XVII | 1603, 1608, 1614, 1624, 1645, 1652 e 1692 |
| XVIII | 1707, 1710–1711, 1721–1727, 1730, 1736–1737, 1744–1747, 1751, 1754, 1760, 1766, 1771–1772, 1777–1778, 1783–1784 e 1791–1793 |
| XIX | 1804, 1808–1809, 1810, 1814, 1816–1817, 1824–1825, 1827–1829, 1830–1833, 1844–1845, 1870, 1877–1879 , 1888–1889, 1891 e 1897–1899 |
| XX | 1900, 1902–1903 , 1907, 1915, 1919 , 1932–1933, 1936, 1941–1944, 1951–1953 , 1958 , 1966 , 1970, 1976, 1979–1981, 1982–1983 , 1986–1987 , 1990–1993, 1997–1998 |
| XXI | 2001–2002, 2007, 2010 , 2012–2018 ⁽²⁾ |

⁽¹⁾Anos de seca durante El Niño são indicados em negrito.

⁽²⁾A seca começou em 2012, mas o El Niño foi de 2015–2016.

Fonte: Folha de São Paulo (2018) e Marengo et al. (2019).

as de 1998, 2002 e 2015–2016 ocorreram durante esse fenômeno. Por outro lado, sabe-se que a variabilidade da temperatura da superfície do mar no Atlântico Norte e Sul tropical também influencia na variação da precipitação no Semiárido (Moura; Shukla, 1981; Nobre et al., 2006; Hastenrath, 2012; Marengo et al., 2016). Logo, essa influência justifica a ocorrência de secas em anos em que não houve El Niño.

Agricultura no Semiárido

A prática da agricultura no Semiárido do Nordeste é, em sua maioria, do tipo de sequeiro, realizada por pequenas propriedades e para a subsistência das famílias. A agricultura de sequeiro utiliza tecnologia de baixo nível e baseia-se, principalmente, em mão de obra familiar, por isso tem baixa produtividade. Produz principalmente milho, feijão e mandioca, para consumo próprio e venda nos mercados locais. Contudo, nessa região densamente povoada, essa agricultura tem grande expressão econômica e muita importância social, pois contribui para a manutenção das comunidades no campo. Dessa forma, quando uma seca atinge essa região, há queda na produção agrícola, o que gera o desemprego (Magalhães et al., 1988; Sun et al., 2007; Lindoso et al., 2014; Bretan; Engle, 2017).

Nos últimos 15 anos, houve melhora significativa nos indicadores de qualidade de vida dessa população, porém os níveis de vulnerabilidade permanecem elevados, especialmente em famílias rurais, que são mais dependentes dessa agricultura (Bedran-Martins; Lemos, 2017).

A seca no Semiárido do Nordeste: problema persistente

A seca iniciada em 2012 é um exemplo de uma situação recente de que o déficit hídrico pluri-anual impacta fortemente a população do Se-

miárido nordestino. Na Figura 1, que mostra a série temporal de chuvas para o pico da estação chuvosa de FMAM no Semiárido, há uma tendência de queda nas últimas três décadas, com os menores valores em 2012–2013. Desde 1845, não havia mais acontecido um período de seis anos consecutivos com chuvas abaixo da média nem de estiagem prolongada nessa região, que normalmente já possui um índice pluviométrico reduzido. Segundo Brito et al. (2017), em 173 anos, houve oito períodos de seca prolongada na área de abrangência do que hoje é chamado de Semiárido brasileiro. Houve também diversos anos de seca intensa, mas sem sequência de anos. Por quatro vezes, foi registrado um período de seca de cinco anos consecutivos: no final do século XIX (1876–1880), no início do século XX (1901–1905) e nos períodos 1929–1933 e 1979–1983. Fecham a lista das estiagens que duraram mais de um ano os biênios 1955–1956 e 1997–1998 e os quatro anos de 1990–1993.

No Nordeste, a distribuição da precipitação é altamente variável de um ano para outro. A precipitação, conforme já comentado, está associada ao fenômeno de variabilidade climática El Niño e ao gradiente de temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico tropical.

Ademais, nessa região, a evapotranspiração potencial também é relativamente maior por causa da maior incidência de radiação solar. Assim, a seca no Nordeste do Brasil é um problema bastante complexo. Não se tem observado uma tendência de reduções significativas de chuva desde 1961, com exceção da quadra chuvosa de FMAM, a partir de 2008–2009. Acrescente-se também aos fatores de tendência de redução de chuvas nos últimos 10 anos o desmatamento da Caatinga e as mudanças no uso da terra na região.

O recente estudo de Marengo et al. (2018) mostra uma distribuição pentadal do índice de aridez, elaborado pela United Nations Environment Programme (Unep), desde o início dos anos 1960. Nesse estudo, a observação de uma sequência de mapas da região mostra um aumento das áreas semiáridas e áridas no período de 2010–2016 no norte do estado da Bahia, consistente com a região onde houve redução das chuvas nos últimos 10 anos.

A seca que começou no início de 2012 foi extremamente crítica em termos de déficit de precipitação e estresse da vegetação terrestre, em comparação com as secas ocorridas nas últimas décadas (Brito et al., 2017; Marengo et al., 2018;

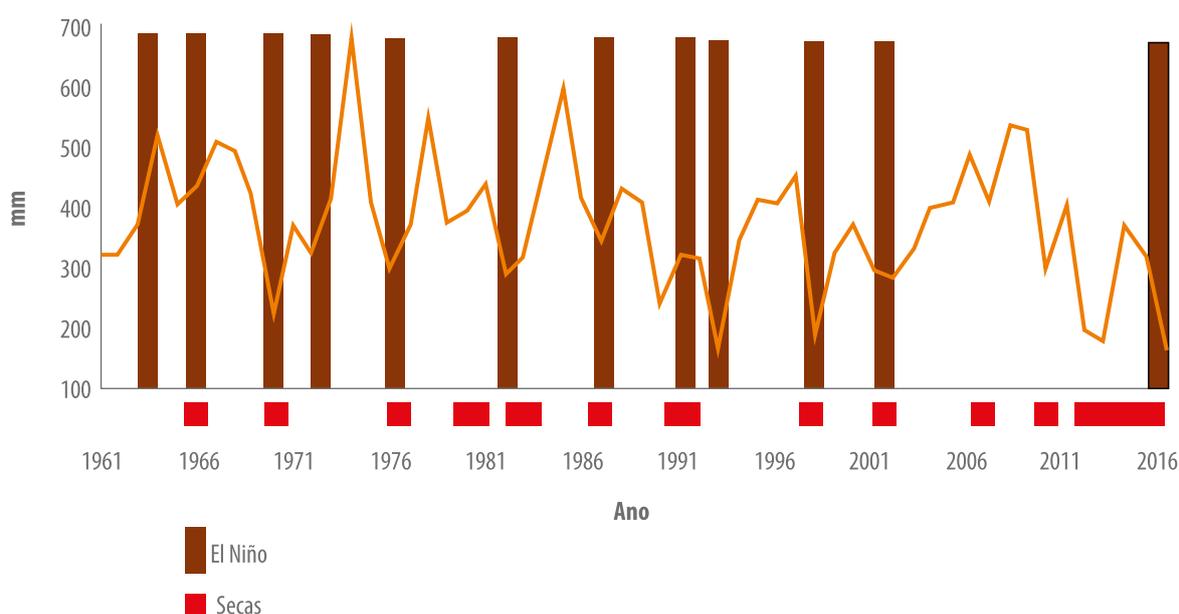


Figura 1. Série temporal de chuvas para o pico da estação chuvosa (fevereiro a maio) no Semiárido do Nordeste, no período de 1961 a 2016.

Martins et al., 2018). Ela afetou uma área maior e trouxe impactos significativos para a população dessa área. Considerando apenas um ano, dos seis anos consecutivos de chuvas abaixo da média, a seca no ano hidrológico de 2015–2016 (outubro a setembro) causou danos à produção agrícola, por isso a produção de grãos na região Nordeste diminuiu cerca de 40%, em comparação com os rendimentos de 2015 (Alvalá et al., 2019). A seca afetou não apenas a região semiárida, mas também a costa leste úmida do Nordeste brasileiro, onde a produção de cana-de-açúcar caiu 19% em relação ao ano anterior (Conab, 2017).

Baseado em mapeamento do solo, Tomasella et al. (2018) avaliaram o grau de degradação usando um índice calculado a partir da persistência e frequência de solo descoberto de 2000 a 2016. Os resultados indicaram que as áreas degradadas aumentaram no período do estudo, principalmente em áreas de pastagem e Caatinga. Essa expansão foi acelerada devido à seca severa que afeta a região desde 2012.

Segundo mapa do Monitor de Secas do Nordeste (Martins et al., 2015), da Agência Nacional de Águas (ANA)¹, 33,6% do território nordestino apresentava, em dezembro de 2017, seca nível 4, o mais alto da escala e classificado como seca excepcional. Em 2015, esse índice chegou a 47% e, em 2016, a 65%. Em 2014, ano com maior quantidade de chuva desde 2012, só 6% do território teve seca excepcional. Até junho de 2018, o Monitor de Secas constatou áreas com chuvas abaixo do normal, a exemplo da faixa centro-norte do Maranhão e Piauí, pontos isolados do Ceará, oeste da Paraíba, Alagoas e nordeste da Bahia, além de grande parte do estado de Sergipe, e seca nível 4 no norte da Bahia.

De acordo com o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden), até maio de 2018, verificou-se a persistência de condição de seca, principalmente nos estados do Maranhão e Piauí, onde 326 municípios foram classificados com condição de seca fraca

e 69 com condição de seca moderada, sendo a maioria localizada no Maranhão e Piauí e em pequenas áreas de Sergipe e da Bahia. As áreas de risco de seca identificadas pelo monitoramento do Cemaden apresentam boa correspondência com os mapas de indicadores de seca derivadas das anomalias de chuva e do Standard Precipitation Index (SPI), do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) e Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e com os mapas de Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), publicado pelo SPEI Global Monitor².

Por causa da seca que iniciou em 2012, e de outras que atingiram a região, iniciou-se uma nova rodada de discussões para melhorar as políticas públicas e de gestão da seca nos âmbitos federal e estadual. Sabe-se que, para mitigar os problemas ocasionados pela seca, há duas opções: uma é reduzir a vulnerabilidade futura e outra é encontrar soluções para enfrentar o problema. No que diz respeito à redução da vulnerabilidade futura, diversas ações foram tomadas pelo governo, em especial a construção de uma infraestrutura hidráulica, como açudes, que armazenam a água dos anos chuvosos para uso nos anos de seca. Nas últimas décadas, os governos federal e estadual tentaram mitigar os impactos adversos da seca, investindo principalmente em infraestrutura de água, como a transposição do Rio São Francisco, construção de canais e reservatórios, sistema hidráulico, bombeamento de água, e aproveitamento de aquíferos, assim como medidas emergenciais, como a distribuição de água por caminhões-pipas, a transferência de dinheiro e programas de microsseguros patrocinados pelo Estado. As ações estão concentradas na distribuição de água, inicialmente para as comunidades rurais, mas também para as comunidades urbanas e áreas costeiras que dependem da água proveniente do Semiárido. Além disso, programas recentes de combate à pobreza melhoraram significativamente os indicadores, como educação, saúde e alívio da pobreza extrema (Lemos et al., 2016).

¹ Disponível em: www.ana.gov.

² Disponível em: <http://spei.csic.es/map/maps.html#-months=1#month=4#year=2018>.

Projeções para o clima futuro

Projeções sobre mudanças climáticas têm mostrado que as regiões semiáridas tropicais e subtropicais são mais propensas a serem seriamente afetadas com a redução das chuvas, em geral com o aumento da intensidade e frequência de secas (Magrin et al., 2014). E esse é o caso do Nordeste do Brasil (Marengo; Bernasconi, 2015; Marengo et al., 2016, 2019; Alvalá et al., 2019), para onde as projeções indicam condições mais secas e tendências de estresse hídrico e aridificação na segunda metade do século XXI (Figura 2). Isso, aliado à degradação da terra, pode levar à desertificação.

A Figura 2 mostra as projeções da variação média anual da temperatura do ar na superfície em relação ao período pré-industrial (1861–1890) no Nordeste, considerando os vários forçamentos radiativos (RCPs) usados pela coleção de modelos globais do Coupled Model Intercomparison Project Phase 5–CMIP5 (Stocker et al., 2013). Os RCPs (Representative Concentration Pathways) levam em conta os impactos das emissões,

ou seja, o quanto haverá de alteração no balanço de radiação no sistema terrestre. Os RCPs são identificados por sua forçante radiativa total, expressa em W/m^2 , a ser atingida durante o (ou próximo ao final do) século XXI: RCP2.6 (cenário de mitigação, levando a um nível muito baixo da forçante), RCP4.5 e RCP6.0 (dois cenários de estabilização) e RCP8.5 (cenário com emissões muito altas de gases de efeito estufa) (Magrin et al., 2014). Cada RCP provê conjuntos de dados, especialmente distribuídos, de mudanças no uso da terra e de emissões setoriais de poluentes do ar e especifica as concentrações anuais de gases de efeito estufa e as emissões antropogênicas até o ano 2100.

A região Nordeste apresenta taxas negativas de precipitação-evaporação no cenário RCP8.5 (cenários mais pessimista), particularmente após maio, com aquecimento acima de $4\text{ }^\circ\text{C}$, sugerindo situações de estresse hídrico na maioria do Semiárido do Nordeste, considerado aquecimento perigoso. Isso é consistente com outros estudos que mostram que a secagem continental e o risco associado à seca foram considerados susceptíveis de aumentar no verão e na primavera nas regiões dos trópicos da América Central e América do Sul (Magrin et al., 2014).

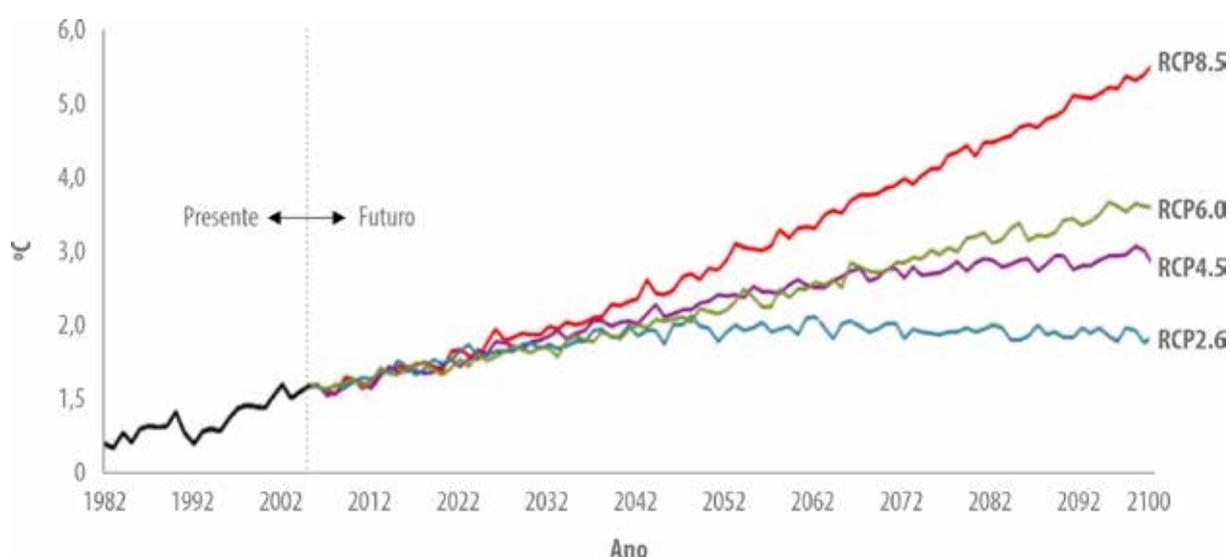


Figura 2. Projeções da variação média anual da temperatura do ar na superfície em relação ao período pré-industrial (1861–1890) no Nordeste brasileiro, para vários cenários RCPs (Representative Concentration Pathways), no período de 1982 até 2100.

Fonte: Marengo et al. (2019).

Índices de número máximo anual de dias secos consecutivos (CDD) e dias muito úmidos (R95P) (Stocker et al., 2013), mostrados em Marengo et al. (2019), indicam aumento significativo no número de dias secos (mais de 20 dias por ano) e na frequência de dias muito úmidos para toda a região no RCP8.5, particularmente na região semiárida do Nordeste, onde o aquecimento projetado é superior a 4 °C. As mudanças na quantidade e no tempo de precipitação (por exemplo, a quantidade de chuva diária intensa e o número de dias secos consecutivos) influenciam fortemente a extensão da área com seca severa ou extrema (Figura 3). O diagrama da precipitação menos a evapotranspiração de Marengo et al. (2019) mostra taxas negativas que estão aumentando até o final do século XXI. Isso sugere que o período com déficit hídrico está aumentando em duração e intensidade, e projetando uma situação em que a estação seca pode ser mais longa no futuro.

As projeções dos modelos climáticos globais do CMIP5, considerando os cenários RCP8.5 para 2040, 2070 e 2100 para o Nordeste, sugerem um aumento no dessecamento na região em razão das reduções globais na precipitação média anual, mas com o aumento dos extremos

de precipitação. Se a temperatura e o déficit hídrico aumentam, e os períodos de estiagem se tornam mais longos, isso leva às secas mais intensas e às condições cada vez mais áridas que devem prevalecer na segunda metade do século XXI. Se esse conjunto de fatores atuantes for mantido ao longo do tempo, isso pode levar ao aumento e intensificação do processo de degradação do solo no Semiárido do Nordeste.

O aquecimento regional acima de 4 °C provavelmente aumentará o risco de secas extremas no Nordeste, onde temperaturas mais altas e precipitação diminuída resultam em situações de déficit hídrico que levam à aridificação e à menor produtividade da vegetação, além de colheitas mais imprevisíveis. Nos municípios onde os meios de subsistência dos pequenos agricultores não são muito diversificados e são dominados pela agricultura de subsistência, a seca severa e até moderada pode causar um declínio nas colheitas (Anderson et al., 2016; Rossato et al., 2017; Marengo et al., 2018; Alvalá et al., 2019). Com o aumento do risco projetado de seca em regiões com aquecimento acima de 4 °C, o cenário da colheita ainda pode ser pior e devastador para a segurança alimentar e a economia do Nordeste.

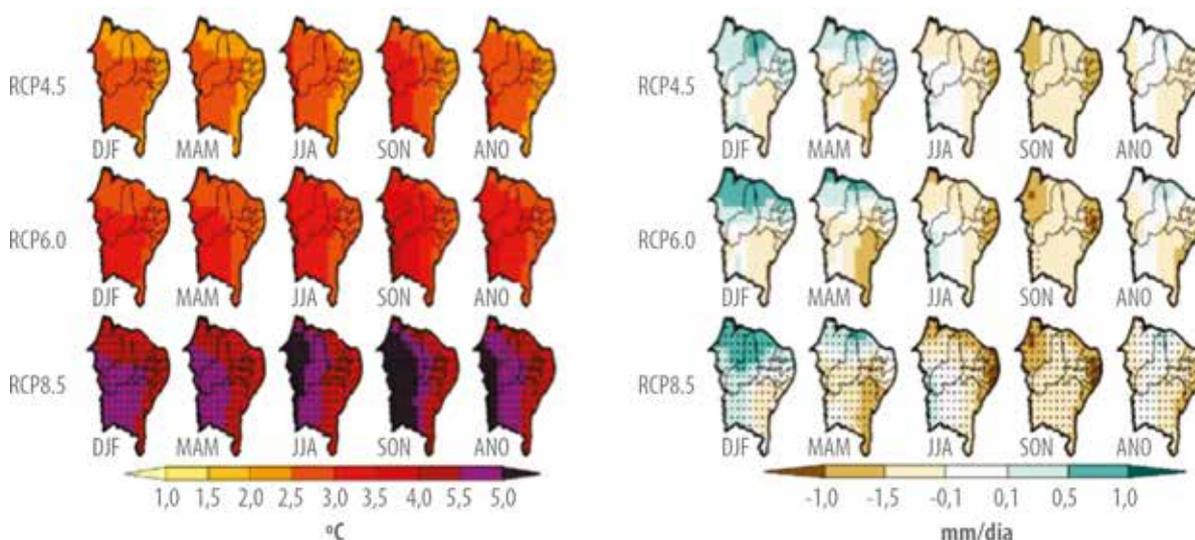


Figura 3. Mudanças na temperatura do ar (painel A) e da precipitação menos evapotranspiração em mm dia^{-1} (painel B), no nível estacional (DJF, MAM, JJA, SON) e anual para os cenários RCP4.5, RCP6.6 e RCP8.5 para o Nordeste brasileiro.

Pontos nos mapas indicam áreas onde o aquecimento regional ultrapassa os 4 °C.

Fonte: Marengo et al. (2019).

Considerações finais

A região semiárida do Nordeste enfrentou na última década a mais longa e drástica seca de sua história. A ciência ainda debate se essa sequência de anos secos poderia ser uma manifestação do aquecimento global, que projeta um Nordeste com menos chuva e maior frequência de extremos climáticos.

O Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (PAN-Brasil) contém algumas ações que podem ser consideradas de adaptação, como educação ambiental e recuperação de áreas degradadas (como o Programa de Recuperação Hidroagrícola no Ceará, mas ainda é um projeto-piloto). Segundo o PAN-Brasil, aproximadamente 15% do território nacional, onde ficam 37 milhões de brasileiros, são afetados pela desertificação. A área de mais de um milhão de quilômetros quadrados abrange 1.492 municípios em nove estados do Nordeste e em partes de Minas Gerais e do Espírito Santo.

Desde 2012, o Cemaden³ vem monitorando a situação da seca no Semiárido do Nordeste, e, com base nas observações, é feita uma estimativa dos vários níveis de risco de seca encontrada (como fraca, moderada, severa e extrema) para fornecer subsídios ao Ministério de Desenvolvimento Agrário na definição da outorga de créditos do Garantia-Safra. Assim, as ações do Cemaden não somente melhoram o conhecimento científico sobre as secas, mas também ajudam a definir políticas públicas de apoio ao pequeno agricultor do Semiárido em situação de calamidade pública.

Existem outros meios que estimam o grau de seca do Nordeste, como o Monitor de Secas do Nordeste da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme)⁴ e da ANA, os

índices de precipitação do Inmet⁵ e do CPTEC⁶. Deveria ser feita uma avaliação integrada entre os vários instrumentos que avaliam os riscos de seca, para mostrar limitações e erros existentes, assim como sua utilidade no monitoramento das secas e dos seus impactos à população. Por exemplo, até maio de 2018 os produtos do Cemaden mostraram risco de seca moderada na maior parte dos estados de Maranhão e Piauí e em pequenas áreas de Sergipe e do norte da Bahia. O Monitor de Secas mostra nível 3–4 de secas no norte da Bahia somente. O mapeamento de risco pelo Cemaden no Nordeste corresponde bem com os mapas de anomalias de chuva, de SPI e SPEI mencionados anteriormente.

Desde a intensa seca de 2012, pela primeira vez, de forma sistemática, as ações de mitigação dos governos federal e estaduais foram guiadas pela melhor informação científica fornecida por organizações de pesquisa, como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), o Cemaden, a área de pesquisa da ANA, entre muitas outras. Essas ações canalizam recursos de mitigação para as áreas criticamente atingidas em ações focalizadas, como transferência de renda, fornecimento de água e apoio à agricultura de subsistência. Esses programas custaram mais de R\$ 40 bilhões aos cofres públicos, mas criaram a necessária rede de proteção social para mais de 10 milhões de habitantes rurais e urbanos em todo o Nordeste. Os impactos de secas consecutivas são devastadores. O nível de reserva hídrica dos médios e grandes açudes, que abastecem grandes e médias cidades, como Fortaleza e Campina Grande, e fornecem água para os carros-pipa, estão em seu mais baixo índice histórico: decaíram de 67,1% de sua capacidade em janeiro de 2012 para 15,6% em meados de janeiro de 2017. No Ceará, Pernambuco e Paraíba, estavam abaixo de 9%, segundo monitoramento da ANA.

³ Disponível em: <http://www.cemaden.gov.br/situacao-atual-da-seca-no-semiarido-e-impactos-maio-de-2018>.

⁴ Disponível em: <http://msne.funceme.br/pg/pagina/show/197>.

⁵ Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/indicePrecipitacaoPadronizada>.

⁶ Disponível em: <http://clima1.cptec.inpe.br/indice/pt> e <http://satelite.cptec.inpe.br/secas>.

Pode-se dizer que, mesmo após muitos planos de ação, projetos e estudos sobre as secas no Semiárido do Nordeste, as políticas hídricas não transformaram o Semiárido brasileiro numa região plenamente adaptada aos extremos da variabilidade do clima. Em alguns casos, medidas como a distribuição de cestas básicas têm sido tradicionalmente inefetivas como ações de mitigação das secas e seus impactos. Neste estudo e outros citados, além de oferecer uma compreensão crítica e abrangente sobre a área semiárida do Brasil, no passado e no presente, sugere-se que os governos estaduais do Nordeste e federal coloquem em prática estratégias político-institucionais para promover a gestão sustentável da seca, no contexto de possíveis mudanças climáticas. Nesse contexto, “indústria da seca” é um termo utilizado no Brasil para designar a estratégia de certos segmentos das classes dominantes que se beneficiam indevidamente de subsídios e vantagens oferecidos pelo governo a partir do discurso político da seca.

A transposição do Rio São Francisco e o programa de carros-pipas podem ser considerados medidas de adaptação. Eles propiciam maior adaptação da população às crises hídricas como as previstas em caso de mudança climática (mais secas). Trata-se de uma adaptação à falta de água. No entanto, os estados ainda não têm planos de adaptação às mudanças do clima – embora alguns já tenham leis. As pesquisas da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), especialmente da Embrapa Semiárido, que estão voltadas para identificar sistemas de produção mais resistentes às secas, ou para identificar culturas que utilizam menos água, como a palma, podem ser consideradas como estratégia de adaptação.

Projeções indicam aumento das secas e das condições áridas até 2100 e aumento da probabilidade de aquecimento acima de 4 °C em meados deste século. Ainda é incerto o que esses déficits de chuva e umidade do solo poderiam significar para a Caatinga ou mesmo se favoreceriam a desertificação. Com o cenário que se desenha com as mudanças climáticas, com climas mais secos e quentes e tendências

para aridificação, surge uma grande e premente questão: como desenvolver a região semiárida de forma sustentável e inclusiva? Sabe-se que o Nordeste tem um enorme potencial de energia eólica e solar, capaz de atender a todas as suas necessidades e ainda exportar grandes quantidades para o restante do Brasil. Essas formas de energia renovável distribuídas geram empregos permanentes localmente, mais numerosos do que aqueles gerados por hidrelétricas ou termoelétricas e que poderiam beneficiar populações urbanas e rurais da região.

Referências

- ALVALÁ, R. C.; CUNHA, A. P. M. A.; BRITO, S. B.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. A.; MORAES, O. L. L.; CARVALHO, M. A. Drought monitoring in the brazilian semi-arid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, 2019. Supplement 1. DOI: [10.1590/0001-3765201720170209](https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170209).
- ANDERSON, M. C.; ZOLIN, C.; SENTELHAS, P. C.; HAIN, C. R.; SEMMENS, K.; YILMAZ, M. T.; GAO, F.; OTKIN, J. A.; TETRAULT, R. The evaporative stress index as an indicator of agricultural drought in Brazil: an assessment based on crop yield impacts. **Remote Sensing of Environment**, v. 174, n. 1, p. 82-99, Mar. 2016. DOI: [10.1016/j.rse.2015.11.034](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.034).
- BEDRAN-MARTINS, A. M.; LEMOS, M. C. Politics of drought under Bolsa Família program in Northeast Brazil. **World Development Perspectives**, v. 7-8, p. 15-21, Sept. 2017. DOI: [10.1016/j.wdp.2017.10.003](https://doi.org/10.1016/j.wdp.2017.10.003).
- BRETAN, E.; ENGLE, N. L. Drought preparedness policies and climate change adaptation and resilience measures in Brazil: an institutional change assessment. In: UITTO, J. I.; PURI, J.; BERG, R. D. van der. (ed.). **Evaluating climate change action for sustainable development**. Cham: Springer, 2017. p. 305-326.
- BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; ARAUJO, M. Frequency, duration and severity of drought in the Brazilian Semi-arid. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 517-529, Aug. 2017. DOI: [10.1002/joc.5225](https://doi.org/10.1002/joc.5225).
- CONAB. **Levantamento de safras**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>. Acesso em: 8 mar. 2017.
- CUNHA, E. D. **Os Sertões**. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1989.
- FOLHA DE SÃO PAULO. Disponível em: <http://arte.folha.uol.com.br/ciencia/2018/crise-do-clima/nordeste/seca-historica-ja-dura-seis-anos-e-ameaca-tornar-se-regra-no-semiarido>. Acesso em: 20 ago. 2019.

- HASTENRATH, S. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: a review. **Climatic Change**, v. 112, n. 2, p. 243-251, 2012. DOI: [10.1007/s10584-011-0227-1](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0227-1).
- HUANG, J.; LI, Y.; FU, C.; CHEN, F.; FU, Q.; DAI, A.; SHINODA, M.; MA, Z.; GUO, W.; LI, Z.; ZHANG, L.; LIU, Y.; YU, H.; HE, Y.; XIE, Y.; GUAN, X.; JI, M.; LIN, L.; WANG, S.; YAN, H.; WANG, G. Dryland climate change: recent progress and challenges. **Reviews of Geophysics**, v. 55, n. 3, p. 719-778, Sept. 2017. DOI: [10.1002/2016RG000550](https://doi.org/10.1002/2016RG000550).
- LEMOES, M. C.; LO, Y. J.; NELSON, D. R.; EAKIN, H.; MARTINS, A. M. B. Linking development to climate adaptation: leveraging generic and specific capacities to reduce vulnerability to drought in NE Brazil. **Global Environmental Change**, v. 39, p. 170-179, July 2016. DOI: [10.1016/j.gloenvcha.2016.05.001](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.001).
- LINDOSO, D. P.; ROCHA, J. D.; DEBORTOLI, N.; PARENTE, I. I.; EIRÓ, F.; BURSZTYN, M.; RODRIGUES FILHO, S. Integrated assessment of smallholder farming's vulnerability to drought in the Brazilian Semi-arid: a case study in Ceará. **Climatic Change**, v. 127, n. 1, p. 93-105, Apr. 2014. DOI: [10.1007/s10584-014-1116-1](https://doi.org/10.1007/s10584-014-1116-1).
- MAGALHÃES, A. R.; FILHO, H. C.; GARAGORRY, F. L.; GASQUES, J. G.; MOLION, L. C. B.; AMORIM NETO, M. da S.; NOBRE, C. A.; PORTO, E. R.; REBOUÇAS, O. E. The effects of climate variations on agriculture in Northeast Brazil. In: PARRY, M.; CARTER, T.; KONIJN, N. (ed.). **The impact of climate variations on agriculture**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988. v. 2, p. 277-304.
- MAGRIN, G. O.; MATENGO, J. A.; BOULANGER, J.-P.; BUCKERIDGE, M. S.; CASTELLANOS, E.; POVEDA, G.; SCARANO, F. R.; VICUÑA, S. Central and South America. In: BARROS, V. R.; FIELD, C. B.; DOKKEN, D. J.; MASTRANDREA, M. D.; MACH, K. J.; BILIR, T. E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K. L.; ESTRADA, Y. O.; GENOVA, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P. R.; WHITE, L. L. (ed.). **Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability - part B: regional aspects**. Cambridge: IPCC: Cambridge University Press, 2014. cap. 27, p. 1499-1566.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALÁ, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S. S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 1, p. 1973-1985, Aug. 2018. Supplement 1. DOI: [10.1590/0001-3765201720170206](https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206).
- MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. A. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, v. 129, n. 1/2, p. 103-115, 2015. DOI: [10.1007/s10584-014-1310-1](https://doi.org/10.1007/s10584-014-1310-1).
- MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; SOARES, W. R.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M.; BRITO, S. S. B.; CUARTAS, L. A.; LEAL, K. D.; RIBEIRO NETO, G.; ALVALÁ, R. C. S.; MAGALHÃES, A. R. Increase risk of drought in the semiarid lands of Northeast Brazil due to regional warming above 4 °C. In: NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. (ed.). **Climate change risks in Brazil**. New York: Springer International, 2019. p. 181-200.
- MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil: past, present and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3/4, p. 1189-1200, 2016. DOI: [10.1007/s00704-016-1840-8](https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8).
- MARTINS, E. S. P. R.; COELHO, C. A. S.; HAARSMA, R.; OTTO, F. E. L.; KING, A. A.; OLDENBORGH, G. J. van; KEW, S.; PHILIP, S.; VASCONSELOS JUNIOR, F. C.; CULLEN, H. A multimethod attribution analysis of the prolonged Northeast Brazil hydrometeorological drought (2012-2016). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 90, p. S65-S69, Jan. 2018. DOI: [10.1175/BAMS-D-17-0102.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0102.1).
- MARTINS, E. S. P. R.; NYS, E. de; MOLEJON QUINTANA, C.; BIAZETO, B.; SILVA, R. F. V.; ENGLE, N. **Monitor de secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**. Brasília, DF: Banco Mundial, 2015. 100 p. (Água Brasil, 10).
- MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, Jan. 1981. DOI: [10.1175/1520-0469\(1981\)038<2653:OTDODI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038<2653:OTDODI>2.0.CO;2).
- NOBRE, P.; MARENGO, J. A.; CAVALCANTI, I. F. A.; OBREGON, G.; BARROS, V.; CAMILLONI, I.; CAMPOS, N.; FERREIRA, A. G. Seasonal-to-decadal predictability and prediction of South American climate. **Journal of Climate**, v. 19, n. 23, p. 5988-6004, Dec. 2006. DOI: [10.1175/JCLI3946.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3946.1).
- QUEIROZ, R. **O Quinze**. 5. ed. Rio de Janeiro: Circulo do Livro, 1989. 162 p.
- ROSSATO, L.; ALVALÁ, R. C. S.; MARENGO, J. A.; ZERI, M.; CUNHA, A. P. M. A.; PIRES, L. B. M.; BARBOSA, H. A. Impact of soil moisture on crop yields over Brazilian semiarid. **Frontiers in Environmental Science**, v. 5, p. 1-16, Nov. 2017. DOI: [10.3389/fenvs.2017.00073](https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00073).
- STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUJELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (ed.). **Climate change 2013: the physical science basis**. Cambridge: IPCC: Cambridge University Press, 2013. 1585 p.
- SUN, L.; LI, H.; WARD, M. N.; MONCUNILL, D. F. Climate Variability and Corn Yields in Semiarid Ceará, Brazil. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, p. 226-240, Feb. 2007. DOI: [10.1175/JAM2458.1](https://doi.org/10.1175/JAM2458.1).
- TOMASELLA, J.; VIERA, R. M. S. P.; BARBOSA, A.; RODRIGUEZ, D. A.; SANTANA, M. O.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, Dec. 2018. DOI: [10.1016/j.jag.2018.06.012](https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012).

Recurso água

Uma análise de limitações e potencialidade para a agricultura

Maria Cléa Brito de Figueirêdo
Edilene Pereira Andrade
Viviane da Silva Barros
Rubens Sonsel Gondim

Introdução

Para atender a necessidade de maior produção de alimentos para uma população crescente, em uma condição de maior temperatura do planeta, projeta-se um incremento de 40% na demanda hídrica pela agricultura. Assim, a crise hídrica é apontada pelo *Fórum Econômico Mundial* (World Economic Forum, 2015) como uma das cinco questões de maior probabilidade e impacto global nos próximos dez anos. Essa crise levará a grandes movimentações populacionais, afetando a geografia de produção agrícola em áreas anteriormente independentes de chuva e ampliando os desafios já enfrentados por perímetros irrigados.

O Brasil apresenta grande disponibilidade hídrica. Porém, todo esse volume é mal distribuído no espaço e no tempo. Devido a essa situação, em diversas regiões do país, especialmente no Semiárido, falta água em determinados períodos do ano. Em algumas partes do Semiárido brasileiro, essa ausência ou dificuldade de acesso à água pode se estender durante todo o ano, sendo necessária a estocagem de água em reservatórios (Agência Nacional de Águas, 2017). Historicamente, a população nessa região enfrenta crises hídricas, com redução parcial ou completa do acesso à água para irrigação, uma vez que é priorizada a oferta para dessedenta-

ção e higienização humana e animal em eventos de escassez hídrica.

Este capítulo aborda a questão da escassez hídrica para a agricultura em região semiárida. Inicialmente, o significado do termo “escassez” é discutido, apresentando-se o modelo Aware (Available water remaining) de medição do nível de escassez e uma análise da situação de escassez nas bacias do Semiárido brasileiro. Outra análise é realizada sobre as principais culturas irrigadas nas bacias consideradas com escassez máxima. São então sugeridas tecnologias para aumento da eficiência na irrigação. Por fim, a avaliação da pegada hídrica de produto é introduzida como ferramenta de apoio à gestão eficiente de insumos (agroquímicos, água e energia) em áreas agrícolas, visando ao aumento do desempenho ambiental da produção agropecuária brasileira.

Escassez hídrica: o que é?

A escassez hídrica pode ser definida como o desequilíbrio entre a disponibilidade de água e a sua demanda. Essas variáveis variam de acordo com as condições da região estudada (Steduto et al., 2012; International Organization for Standardization, 2014). O desequilíbrio entre demanda e disponibilidade pode considerar apenas o aspecto quantitativo do volume de água (escassez física), como definido na norma

ISO 14046 (International Organization for Standardization, 2014), ou abranger aspectos de qualidade da água (uso degradativo) e acesso da população à água, como definido por Steduto et al. (2012). De acordo com Steduto et al. (2012), a escassez hídrica deve considerar duas dimensões principais:

- Escassez de disponibilidade, ou seja, a falta de água em quantidade e qualidade aceitável para atender à demanda existente, incluindo fluxos naturais.
- Escassez econômica devido à falta de infraestrutura adequada, independente dos recursos hídricos disponíveis, causada por problemas financeiros, técnicos ou por falhas nas instituições responsáveis por garantir água confiável, segura e de forma equitativa a todos os usuários.

Alguns modelos estão disponíveis para cálculo de índices de escassez hídrica em bacias hidrográficas (Castro et al., 2018), sendo cada um baseado no conceito de escassez que abrange ou não aspectos quantitativos, qualitativos e de acesso à água. O cálculo desses índices é fundamental para planejamento de gestão nas bacias, em especial nas que mais passam por períodos de escassez, necessitando de ações urgentes de incentivo ao uso eficiente da água disponível.

Dentre os modelos de escassez hídrica, destaca-se o Aware, proposto por Boulay et al. (2018). Esse modelo foi indicado pelo Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas para avaliação de escassez hídrica em estudos de pegada de escassez hídrica de produtos.

O modelo Aware para avaliação do nível de escassez hídrica

O índice de escassez do modelo Aware avalia o potencial relativo da privação de água, tanto para os seres humanos como para os ecossistemas. Esse modelo baseia-se no pressuposto de que quanto menos água estiver disponível por área, mais provável será que outro usuário

seja afetado pela escassez (Boulay et al., 2015). O modelo gera fatores que variam entre 0,1 e 100, sendo 100 o máximo de escassez que pode ser verificado em uma bacia.

Aplicando-se dados de disponibilidade e demanda hídrica da Agência Nacional de Águas (ANA) no modelo Aware, foram gerados índices para as Unidades Hidrográficas Estaduais (UHEs) localizadas no Semiárido brasileiro (Andrade et al., 2019). Nos limites do Semiárido, delimitado em 2017, estão contidas 80 Unidades Hidrográficas Estaduais (UHE). Essas UHEs foram definidas em relação aos limites geográficos estaduais e limites hidrológicos com o objetivo de facilitar a gestão dos recursos hídricos no País (Figura 1).

Escassez hídrica em bacias no Semiárido brasileiro

A regionalização do modelo Aware com dados da ANA mostra que, ao todo, cinco UHEs apresentaram fatores de escassez mínimos anuais, significando que a escassez nessas UHEs é mínima, durante todo o ano (Figura 2). Todas essas UHEs se localizam na Região Hidrográfica do São Francisco. Doze UHEs apresentaram fatores de escassez iguais a 100 durante todo o ano, o que significa que, em todos os meses do ano, a escassez é máxima nessas bacias. O norte do Semiárido, que contém praticamente toda a região Nordeste, é mais escasso hidricamente que o sul, o que se reflete também nos índices de escassez mais altos na área superior do que na área inferior do mapa (Figura 2).

Analisando os valores mensais dos índices de escassez nas UHEs do Semiárido, observa-se que o mês de outubro apresenta a maior média de UHEs com índices máximos (100), seguido dos meses setembro e dezembro. Esses meses são os de maior estiagem no Semiárido. Já o mês com menor índice médio foi abril, seguido de março e maio (Figura 2). É nesse período que se concentram as chuvas nessa região, implicando no aumento da disponibilidade hídrica e diminuição da demanda de irrigação. Esses



Figura 1. Unidades Hidrográficas Estaduais (UHEs) inseridas no Semiárido brasileiro.

dados são relevantes para o planejamento da irrigação na região, pois podem auxiliar na decisão sobre quando e onde plantar, buscando-se evitar áreas cuja escassez hídrica possa causar prejuízos ao agricultor ou ao sistema de cultivo.

Principais culturas irrigadas nas bacias com nível máximo de escassez no Semiárido

Na Figura 3, são apresentados os municípios com mais de 1.000 ha de área irrigada, de acordo com dados do IBGE (2016). Percebe-se que há áreas irrigadas em 12 UHEs (Verde e Jacaré, Carnaíba de Dentro, Vaza-Barris, Salitre, Verde Grande, Baixo Jaguaribe, Terra Nova, Pontal, Terra Nova, Gl6 e Potengi, Boqueirão) com elevada escassez hídrica no ano todo, o que pode causar prejuízos e rendimentos abaixo do esperado nas culturas. É preciso avaliar os períodos com

maior demanda por irrigação e quais culturas estão sendo irrigadas nessas áreas para uma análise mais profunda da situação.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016), cerca de 70 culturas foram cultivadas em UHEs do Semiárido com máximo índice de escassez (100), durante o ano todo. Essas culturas estão distribuídas em 29 municípios dos estados do Ceará, Bahia, Pernambuco e Rio Grande do Norte. As principais culturas (Tabela 1), em termos percentuais de área plantada, nesses municípios foram: caju (*Anacardium occidentale* L.) (26,97%), milho (*Zea mays* L.) (22,53%), feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) (15,33%), banana (*Musa* spp.) (9,90%), coco-da-baía (*Cocos nucifera* L.) (4,69%), manga (*Mangifera indica* L.) (5,49%), mamona (*Ricinus communis* L.) (5,15%), mandioca (*Manihot esculenta*) (5,17%), videira (*Vitis vinifera* L.) (2,62%) e goiabeira (*Psidium guajava* L.) (2,15%), totalizando uma área de 195.605 ha, que corresponde a 91% da área to-

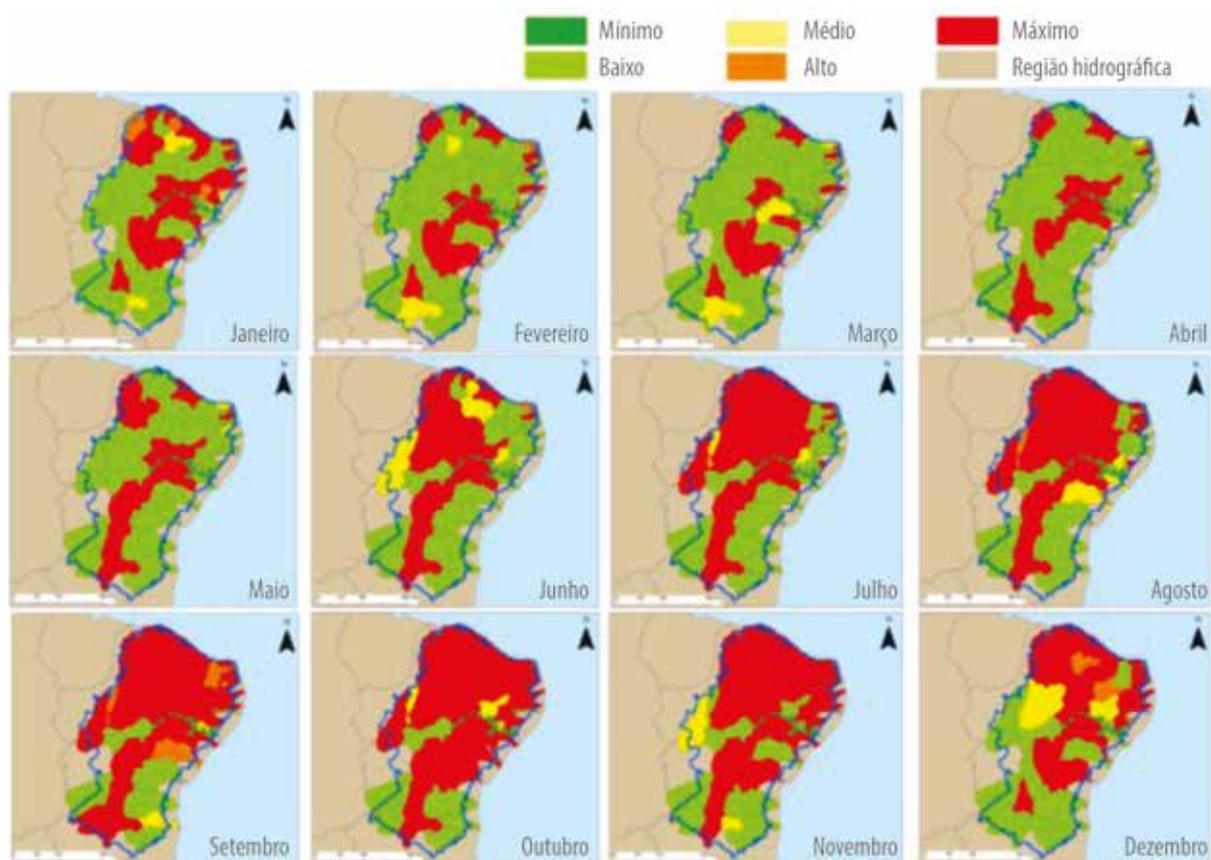


Figura 2. Classificação qualitativa de fatores de caracterização de escassez hídrica mensais para Unidades Hidrográficas Estaduais (UHEs) inseridas no Semiárido.

Índices: mínimo (0,1); máximo (100); baixo (0,2 a 33,3); médio (33,4 a 66,6); e alto (66,7 a 99,9).

tal das principais culturas produzidas na região (214.599 ha). Assim, a produção dessas culturas é muito afetada por eventos constantes de escassez hídrica, especialmente se a produção depender de irrigação em determinadas épocas do ano, como ocorre com as culturas perenes do coco, banana, manga, goiaba e uva.

O estudo sobre agricultura irrigada no Brasil (Agência Nacional de Águas, 2016) apresenta padrões entre métodos de irrigação e culturas, informando que há forte correlação entre o método de inundação e o cultivo de arroz; entre o gotejamento e o café e a fruticultura; entre a aspersão convencional e a cana-de-açúcar; e entre os pivôs centrais e a produção de algodão, feijão, milho e soja. Sabe-se que os sistemas com irrigação por gotejamento são os mais eficientes no uso da água (eficiência cerca de 90%), enquanto a irrigação por superfície é o

sistema onde ocorre maiores perdas (eficiência cerca de 60%), estando a irrigação por aspersão com nível intermediário de eficiência (cerca de 75%) (Brouwer et al., 1989). Assim, observa-se que há espaço para melhoria na eficiência do uso da água em grande parte das áreas irrigadas com cana-de-açúcar e grãos localizadas em bacias com índices máximo de escassez hídrica na região semiárida brasileira.

No *Atlas de Irrigação*, publicado em 2017 (Agência Nacional de Águas, 2017), foram identificadas áreas irrigadas em bacias do Semiárido com condição máxima de escassez hídrica. Verificaram-se 82.839 ha irrigados, entre sistema de inundação pivô central e demais sistemas de irrigação (Tabela 2). Se for comparada a área das demais culturas irrigadas com pivô central e outros sistemas de irrigação com a área das principais culturas produzidas nessas bacias

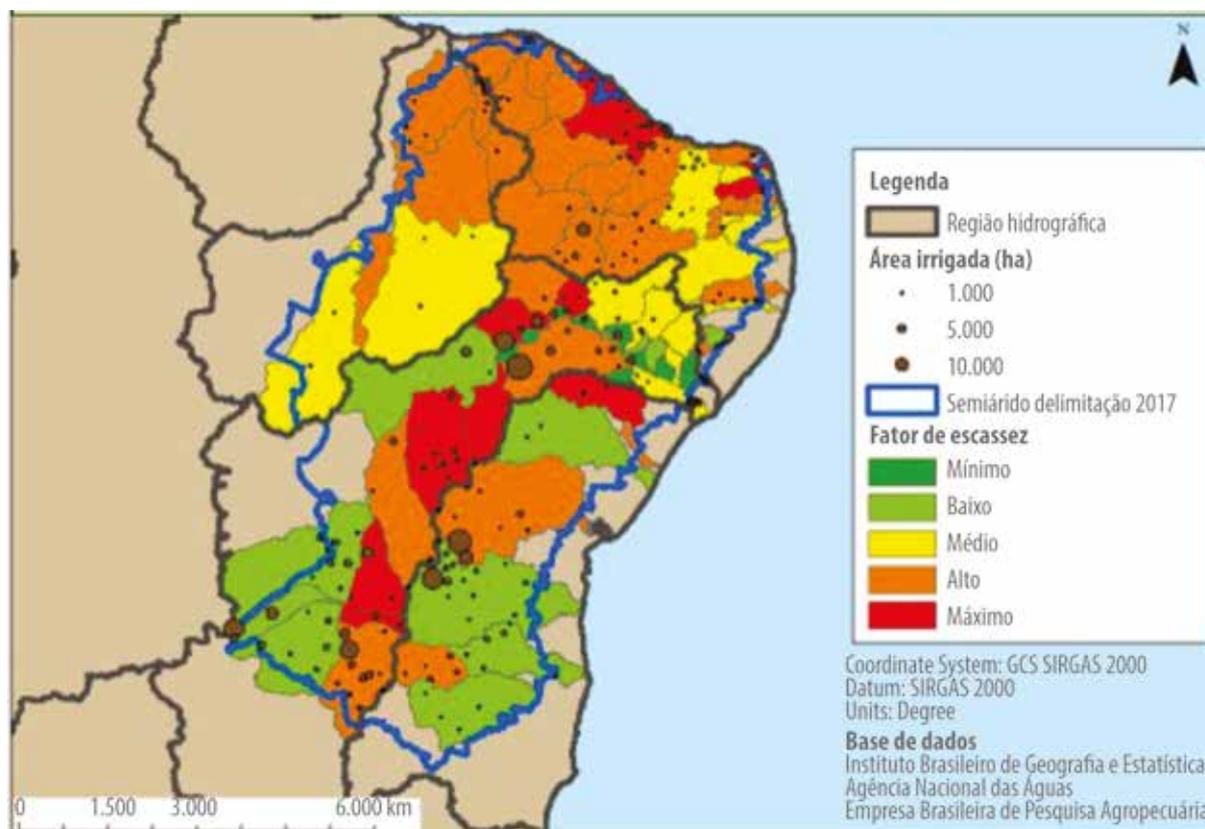


Figura 3. Municípios com área irrigada em Unidades Hidrográficas Estaduais (UHEs) classificadas por índices de escassez hídrica.

Índices: mínimo (0,1); máximo (100); baixo (0,2 a 33,3); médio (33,4 a 66,6); e alto (66,7 a 99,9).

hidrográficas (Tabela 1), verifica-se que 41% das culturas nas bacias com alta escassez são irrigadas. Os principais municípios com produção irrigada, em bacia de alta escassez, são Petrolina (22,23%), Santa Maria da Boa Vista (10,98%) e Bom Jesus da Lapa (9,42%) (Tabela 2).

Informações detalhadas sobre quais culturas são irrigadas nas bacias hidrográficas do Semiárido e quais os diferentes sistemas de irrigação utilizados não se encontram nesses estudos (Tabela 1 e 2). Entretanto, esses dados são de fundamental importância para que se faça um gerenciamento adequado dos recursos hídricos nas diferentes bacias hidrográficas.

No Ceará, a Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (Adece), em parceria com o Instituto Centro de Ensino Tecnológico (Centec), tem realizado periodicamente o levantamento de áreas irrigadas por bacia estadual. Na sub-bacia do Baixo Jaguaribe, considerada de

máxima escassez hídrica (FC=100), os municípios de Aracati, Quixeré, Icapuí, Itaíçaba, Russas e Tabuleiro do Norte possuem áreas irrigadas (Tabela 3). Observa-se que a produção de frutas é uma atividade chave nessa bacia, principalmente banana, nos municípios de Quixeré e Russas, e melão, nos municípios em Aracati, Icapuí e Quixeré.

As culturas listadas na Tabela 3 foram responsáveis em 2019 por uma demanda hídrica na sub-bacia do Baixo Jaguaribe em torno 135.360 (1.000 m³ ano⁻¹) de volume aplicado (Tabela 4). Somente a produção de banana, coco-da-baía e melão demandaram 77,68% desse volume (Tabela 3).

A produção de frutas requer segurança hídrica para obter os rendimentos esperados. Entretanto, isso não tem ocorrido na sub-bacia do Baixo Jaguaribe, que se encontra atualmente com apenas 27,2% da sua capacidade de armazenamento (Funceme, 2021).

Tabela 1. Levantamento de áreas plantadas em hectare (ha) com cultivos temporários e permanentes, localizadas nas bacias hidrográficas com índice de escassez hídrica máxima.

| Município | Estado | Unidade Hidrográfica Estadual (UHE) | Banana (cacho) | Castanha-de-caju | Coco-da-baía | Feijão (grão) | Goiaba | Mamona (baga) | Mandioca | Manga | Milho (grão) | Uva | Total |
|--------------------------|--------|-------------------------------------|----------------|------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|----------------|
| América Dourada | BA | Verde e Jacaré | 10 | - | - | 2.100 | - | 1.000 | 5 | - | 4.100 | - | 7.215 |
| Bom Jesus da Lapa | BA | Carnaíba de Dentro | 8.500 | - | 58 | 5.200 | 20 | 48 | 2.200 | 6 | 5.800 | - | 21.832 |
| Canudos | BA | Vaza-Barris | 1.417 | - | 12 | 443 | 15 | - | 110 | 6 | 121 | - | 2.124 |
| Guanambi | BA | Carnaíba de Dentro | 15 | - | 10 | 1.510 | 3 | 5 | 1.540 | 10 | 300 | 2 | 3.395 |
| Ibititá | BA | Verde e Jacaré | 35 | - | 20 | 162 | - | 500 | 300 | 15 | 1.600 | - | 2.632 |
| Irecê | BA | Verde e Jacaré | 11 | - | 25 | 70 | - | 40 | 100 | 15 | 400 | - | 661 |
| Itaguaçu da Bahia | BA | Verde e Jacaré | 38 | - | 16 | 190 | - | 90 | 45 | 45 | 540 | - | 964 |
| Jeremoabo | BA | Vaza-Barris | 55 | - | 50 | 2.900 | 12 | - | 50 | - | 9.215 | - | 12.282 |
| João Dourado | BA | Verde e Jacaré | 10 | - | 20 | 130 | - | 80 | 10 | - | 600 | - | 850 |
| Lapão | BA | Verde e Jacaré | 50 | - | 45 | 85 | - | 7.000 | 150 | - | 500 | - | 7.830 |
| Malhada | BA | Carnaíba de Dentro | 50 | - | 5 | 700 | - | 500 | 150 | - | 500 | - | 1.905 |
| Mirangaba | BA | Salitre | 170 | - | - | 1.600 | - | 500 | 700 | - | 2.350 | - | 5.320 |
| Presidente Dutra | BA | Verde e Jacaré | 11 | - | 11 | 300 | - | 300 | 300 | 24 | 3.000 | - | 3.946 |
| Sebastião Laranjeiras | BA | Verde Grande | 400 | - | 20 | 500 | 2 | - | 80 | 10 | 250 | 3 | 1.265 |
| Sento Sé | BA | Verde e Jacaré | 200 | - | 30 | 3.200 | - | - | 1.200 | 620 | 2.500 | 9 | 7.759 |
| Urandi | BA | Verde Grande | 150 | - | 80 | 1.550 | - | 10 | 50 | - | 200 | - | 2.040 |
| Aracati | CE | Baixo Jaguaribe | 113 | 17.824 | 370 | 554 | 34 | - | 264 | 96 | 566 | - | 19.821 |
| Icapuí | CE | Baixo Jaguaribe | 20 | 14.088 | 1.024 | 180 | 6 | - | 60 | 12 | 121 | - | 15.511 |
| Itaiçaba | CE | Baixo Jaguaribe | 15 | 855 | 35 | 110 | - | - | 50 | - | 90 | - | 1.155 |
| Quixeré | CE | Baixo Jaguaribe | 1.173 | 10 | 597 | 581 | 60 | - | - | 230 | 657 | - | 3.308 |
| Russas | CE | Baixo Jaguaribe | 1.185 | 6.986 | 192 | 1.168 | 328 | - | 608 | 46 | 1.134 | 20 | 11.667 |
| Tabuleiro do Norte | CE | Baixo Jaguaribe | 30 | 985 | 17 | 1.750 | 3 | - | - | 5 | 2.230 | - | 5.020 |
| Cabrobó | PE | Terra Nova | 15 | - | 60 | 700 | 10 | - | - | 40 | 700 | - | 1.525 |
| Petrolina | PE | Pontal | 2.160 | - | 2.230 | 2.800 | 2.140 | - | 300 | 8.190 | 4.000 | 4.802 | 26.622 |
| Salgueiro | PE | Terra Nova | 10 | - | 30 | 500 | 30 | - | - | 6 | 500 | - | 1.076 |
| Santa Maria da Boa Vista | PE | GI6 | 2.800 | - | - | 750 | 1.540 | - | 500 | 1.300 | 1.500 | 280 | 8.670 |
| Terra Nova | PE | Terra Nova | 8 | - | - | - | - | - | - | - | 200 | - | 208 |
| Macaíba | RN | Potengi | 15 | 9.000 | 220 | 100 | - | - | 400 | 12 | 200 | - | 9.947 |
| Touros | RN | Boqueirão | 700 | 3.000 | 4.000 | 150 | 5 | - | 950 | 50 | 200 | - | 9.055 |
| Total | | | 19.366 | 52.748 | 9.177 | 29.983 | 4.208 | 10.073 | 10.122 | 10.738 | 44.074 | 5.116 | 195.605 |
| % | | | 9,90 | 26,97 | 4,69 | 15,33 | 2,15 | 5,15 | 5,17 | 5,49 | 22,53 | 2,62 | 100 |

Tabela 2. Levantamento de áreas irrigadas, localizadas nas bacias hidrográficas com índice máximo de escassez.

| Município | Estado | Arroz inundado (ha) | Cana-de-açúcar (ha) | Demais culturas em pivôs centrais (ha) | Demais culturas e sistemas (ha) | Total (ha) | % |
|--------------------------|--------|---------------------|---------------------|--|---------------------------------|------------|-------|
| Aracati | CE | - | - | 22 | 2.776 | 2.798 | 3,38 |
| Icapuí | CE | - | - | - | 2.560 | 2.560 | 3,09 |
| Itaiçaba | CE | - | 250 | 620 | - | 870 | 1,05 |
| Quixeré | CE | 90 | - | 513 | 2.495 | 3.098 | 3,74 |
| Russas | CE | 50 | 95 | 885 | 744 | 1.774 | 2,14 |
| Tabuleiro do Norte | CE | 150 | - | 773 | 428 | 1.351 | 1,63 |
| Macaíba | RN | - | 822 | - | 152 | 975 | 1,18 |
| Touros | RN | - | - | 1.098 | 645 | 1.743 | 2,10 |
| Cabrobó | PE | 500 | - | - | 2.874 | 3.374 | 4,07 |
| Petrolina | PE | - | - | 816 | 22.569 | 23.385 | 28,23 |
| Salgueiro | PE | - | - | - | 774 | 774 | 0,93 |
| Santa Maria da Boa Vista | PE | - | - | 335 | 8.760 | 9.094 | 10,98 |
| Terra Nova | PE | - | - | - | 644 | 644 | 0,78 |
| América Dourada | BA | - | - | 1.105 | 1.073 | 2.178 | 2,63 |
| Bom Jesus da Lapa | BA | - | 9 | 584 | 7.215 | 7.807 | 9,42 |
| Canudos | BA | - | - | - | 1.927 | 1.927 | 2,33 |
| Guanambi | BA | - | - | - | 1.053 | 1.053 | 1,27 |
| Ibititá | BA | - | - | 301 | 558 | 859 | 1,04 |
| Irecê | BA | - | - | 384 | 715 | 1.100 | 1,33 |
| Itaguaçu da Bahia | BA | - | - | 233 | 410 | 644 | 0,78 |
| Jeremoabo | BA | - | - | - | 1.018 | 1.018 | 1,23 |
| João Dourado | BA | - | - | 1.416 | 931 | 2.347 | 2,83 |
| Lapão | BA | - | - | 804 | 1.351 | 2.155 | 2,60 |
| Malhada | BA | - | - | 1.111 | 358 | 1.469 | 1,77 |
| Presidente Dutra | BA | - | - | 21 | 1.357 | 1.378 | 1,66 |

Continua...

Tabela 2. Continuação.

| Município | Estado | Arroz inundado (ha) | Cana-de-açúcar (ha) | Demais culturas em pivôs centrais (ha) | Demais culturas e sistemas (ha) | Total (ha) | % |
|-----------------------|--------|---------------------|---------------------|--|---------------------------------|---------------|------------|
| Sebastião Laranjeiras | BA | - | 41 | 50 | 2.147 | 2.238 | 2,70 |
| Sento Sé | BA | - | 4 | 339 | 2.875 | 3.219 | 3,89 |
| Terra Nova | BA | - | - | - | - | - | 0,00 |
| Urandi | BA | - | 4 | - | 1.003 | 1.007 | 1,22 |
| Total | | 790 | 1.225 | 11.410 | 69.412 | 82.839 | 100 |

Fonte: Agência Nacional de Águas (2017).

Tabela 3. Principais culturas irrigadas da sub-bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe, no Ceará, em 2019.

| Cultura | Aracati (ha) | Icapuí (ha) | Itaiçaba (ha) | Quixeré (ha) | Russas (ha) | Tabuleiro do Norte (ha) | Área colhida (ha) |
|----------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------|
| Banana (cacho) | 76 | 12 | 6 | 600 | 599 | 162 | 1.455 |
| Coco-da-baía | 407 | 653 | 35 | 275 | 272 | 3 | 1.645 |
| Goiaba | 32 | 6 | - | 6 | 469 | - | 513 |
| Limão | - | 2 | - | 25 | 40 | 90 | 157 |
| Mamão | 130 | 136 | - | 165 | 36 | 3 | 470 |
| Manga | 72 | 9 | - | 148 | 15 | 1 | 245 |
| Melancia | 500 | 40 | - | 130 | 2 | 2 | 674 |
| Melão | 840 | 540 | - | 450 | - | - | 1.830 |
| Total | 2.057 | 1.398 | 41 | 1.799 | 1.433 | 261 | 6.989 |

Fonte: IBGE (2019).

A estimativa de demanda hídrica realizada para algumas culturas mostra a relevância de levantar dados sobre a demanda hídrica e áreas irrigadas no Semiárido. Esse trabalho permitirá gerenciar a alocação de culturas nas diferentes bacias hidrográficas, visando ao desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada na região semiárida. A partir da comparação entre demanda atual e necessidade hídrica real das culturas, poder-se-á identificar oportunidades de redução no consumo em regiões com escas-

sez máxima, aumentando a segurança hídrica e de produção de alimentos nesses locais.

Tecnologias para maior eficiência na irrigação

Reconhece-se que o aumento da eficiência no uso da água na irrigação é capaz de exercer importante papel na adaptação em um futuro com maior demanda hídrica para a agricultura.

Tabela 4. Volume hídrico de culturas irrigadas (perenes e anuais), implantadas na sub-bacia do Baixo Jaguaribe, no Ceará, em 2019.

| Cultura | Área cultivada (ha) | Lâmina anual aplicada (mm) | Lâmina anual necessária (mm) | Volume anual aplicado (1.000 m ³) | Volume anual necessário (1.000 m ³) | Excesso anual aplicado (1.000 m ³) |
|----------------|---------------------|----------------------------|------------------------------|---|---|--|
| Banana (cacho) | 1.455 | 2.400 | 1.850 | 34.920 | 26.918 | 8.003 |
| Coco-da-baía | 1.645 | 2.500 | 1.927 | 41.125 | 31.699 | 9.426 |
| Goiaba | 513 | 1.590 | 1.281 | 8.157 | 6.572 | 1.585 |
| Limão | 157 | 1.259 | 1.222 | 1.977 | 1.919 | 58 |
| Mamão | 470 | 1.760 | 1.168 | 8.272 | 5.490 | 2.782 |
| Manga | 245 | 1.300 | 833 | 3.185 | 2.041 | 1.144 |
| Melancia | 674 | 1.280 | 950 | 8.627 | 6.403 | 2.224 |
| Melão | 1.830 | 1.590 | 707 | 29.097 | 12.938 | 16.159 |
| Total | 6.989 | - | - | 135.360 | 93.978 | 41.381 |

Fonte: Agência de desenvolvimento estado do Ceará (2015) e IBGE (2019).

Dessa forma, tecnologias para otimização do uso da água de irrigação devem ser adotadas. Também, a operacionalização de reservatórios baseada em otimização por modelagem hidrológica, entrega de água ao usuário em quantidade e de acordo com as necessidades e de forma precisa e instalação universal de hidrômetros são medidas estratégicas a serem consideradas para melhoria da eficiência de uso da água na irrigação.

A definição precisa do momento e do quanto irrigar depende de um conjunto de estratégias, o qual deve focar: disponibilidade de estações meteorológicas para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), determinação de coeficientes de cultivos (kc) das espécies cultivadas nas diferentes fases de desenvolvimento das plantas, adoção de práticas de retenção hídrica no solo e, especialmente, disseminação de informação técnica aos irrigantes.

Assim, as principais oportunidades para otimizar o uso da água de irrigação no Semiárido podem ser elencadas a seguir:

- Adoção, preferencialmente, da irrigação localizada, por gotejamento ou microaspersão, bem como avaliação da uniformidade de aplicação da água periodicamente, realizando a manutenção preventiva do sistema para reparos de possíveis vazamentos ou entupimentos, visando ao alcance de uma alta uniformidade de distribuição (Figura 4).
- Desenvolvimento e adoção pelos produtores de aplicativos para dispositivos móveis, visando à disseminação da informação da evapotranspiração de referência em tempo real e controle do tempo de irrigação capaz de suprir as necessidades hídricas dos cultivos.
- Aplicação de condicionadores de solos, tais como biocarvão e hidrogel, para aumento da retenção hídrica na zona radicular. Os hidrogéis são polímeros hidroabsorventes que retêm água no solo (Sarvas et al., 2007). Já o biocarvão (Figura 5) é um material carbonizado de uma combustão incompleta de material orgânico. Esses materiais têm sido aplicados com o objetivo de melhorar a fertilidade do solo, mitigar os efeitos das

Foto: Rubens Sonsol Gondim



Figura 4. Irrigação por gotejamento.

Foto: Rubens Sonsol Gondim



Figura 5. Biocarvão aplicado como condicionador de solo para aumentar retenção hídrica.

mudanças climáticas através do aumento de sequestro de carbono no solo, redução das emissões de gases de efeito estufa e aumento da capacidade de retenção de água (Karhu et al., 2011). Gondim et al. (2017) observaram mínimo consumo de água (70 L) no cajueiro com uso de biocarvão, quando se aplicou 0,5 kg de biocarvão por planta.

- Aplicação de cobertura morta ou plantio direto na palha para reduzir perdas por evaporação (Figuras 6 e 7). Saraiva et al. (2017) obtiveram melhores produtividades de melancia e maior teor de sólidos solúveis (°Brix) nos frutos quando aplicaram a mesma quantidade de água em solo com cobertura de casca de arroz, em relação ao solo sem cobertura.
- Aplicação de mulch branco, uma vez que promove retenção hídrica na superfície do solo, reduzindo perdas por evaporação (Figura 8). Em estudo com várias coberturas de solo em cultivo de melancia, Saraiva et al. (2017) concluíram que mulch plástico branco resultou em maior retenção hídrica

Foto: Rubens Sonsol Gondim



Figura 6. Aplicação de cobertura morta na produção de bananeira irrigada.

com maior produtividade e frutos de melhor qualidade.

- Utilização de sensores de umidade no solo. Há vários tipos no mercado, como os tensiômetros de simples utilização (Figura 9). Eles in-



Foto: Viviane da Silva Barros

Figura 7. Plantio direto na palha de melão irrigado.



Foto: Rubens Sonsol Gondim

Figuras 8. Mulch plástico branco no cultivo de melão.



Foto: Rubens Sonsol Gondim

Figura 9. Sensores de umidade do solo.

dicam a tensão em que a umidade está retida no solo dando ideia do nível de água disponível para as plantas e indicação do momento e quanto irrigar. Macedo et al. (2012) avaliaram a irrigação de bananeira, cultivar Pacovan Ken, irrigada por microaspersão em irrigação controlada por três sensores de resistência elétrica tipo matriz granular (modelo Watermark), tendo sido instalados em cada parcela em três profundidades (0,15 m; 0,30 m e 0,50 m). Os tratamentos consistiram em iniciar as irrigações quando a tensão da água na zona radicular da cultura (0-0,4 m) atingisse -15 kPa, -30 kPa, -45 kPa e -60 kPa. Esses autores concluíram que a melhor relação custo/benefício encontrada foi obtida quando as irrigações foram iniciadas na tensão de água no solo de -15 kPa (com aplicação de 2.538 mm), sem redução de produtividade.

Avaliação da pegada hídrica como instrumento de gestão na agricultura irrigada

De acordo com a ISO 14046 (International Organization for Standardization, 2014), um estudo de pegada hídrica avalia a pressão que os processos relacionados ao ciclo de vida de um produto geram sobre a água nas várias regiões onde esses processos ocorrem. Essa pressão se dá tanto pelo consumo de água quanto pelas emissões de poluentes que modificam a quali-

dade da água, sendo quantificada considerando os processos relacionados ao ciclo de vida do produto em estudo (extração de recursos minerais, produção de agroquímicos, produção agrícola, uso e descarte final de um produto).

Assim, estudos de pegada hídrica abrangem várias categorias de impacto relacionadas à água (por exemplo: escassez hídrica, eutrofização e ecotoxicidade aquática), apresentando o perfil de impactos potenciais de um produto sobre a água. Figueirêdo et al. (2017) detalharam o passo a passo de um estudo de pegada hídrica, mostrando como o impacto em cada categoria relacionada à água é calculado. De acordo com esses autores, multiplica-se o(s) aspecto(s) ambiental relevante para cada categoria de impacto por um fator de impacto, gerado por um modelo ecológico que considera a propensão de uma região à ocorrência do problema em questão.

Exemplificando, o modelo Aware, apresentado anteriormente, gera índices de escassez hídrica para regiões hidrográficas em todo o mundo, que são considerados fatores de impacto. Quando esse modelo é utilizado no cálculo do impacto de um produto na escassez hídrica, multiplica-se o consumo de água em cada processo relacionado ao ciclo de vida de um produto pelo índice (fator) de escassez na região onde cada processo ocorre. Realiza-se então o somatório dos impactos causados por todos os processos para determinação do impacto do produto na escassez hídrica.

Estudos de pegada hídrica de produtos agrícolas têm contribuído com a identificação de sistemas de cultivo menos impactantes e dos processos que mais contribuem para cada categoria de impacto relacionada à água. Essas informações são o ponto de partida para definição de estratégias que reduzem os impactos relacionados à água. Apresentam-se a seguir alguns estudos de pegada hídrica de produtos irrigados em regiões semiáridas e áridas.

Santos et al. (2018) compararam os impactos na água do melão irrigado, considerando os sistemas convencional e conservacionista (rotação do melão com adubos verdes oriundos de coquetéis

vegetais) de cultivo na região do Médio São Francisco. Observou-se que o consumo de água no sistema convencional era superior a necessidade hídrica da cultura nessa região, o que também foi observado por Figueirêdo et al. (2014), quando avaliou a pegada de escassez hídrica do melão produzido na região de Jaguaribe-Açu. Constatou-se ainda que o sistema conservacionista baseado na rotação do melão com adubos verdes reduziu o impacto na eutrofização e toxicidade, por requerer menos adubos nitrogenados e pesticidas. Assim, o sistema conservacionista de produção foi indicado para redução da pegada hídrica de melão no Médio São Francisco, quando se consideram as categorias de escassez hídrica, toxicidade e eutrofização.

No estudo da pegada hídrica da manga cultivada em sistema convencional na região do São Francisco, realizado por Carneiro et al. (2019), observou-se que a produção de fertilizantes, de eletricidade utilizada na irrigação e de manga foram os processos que mais contribuíram com a pegada hídrica, avaliando-se os impactos relacionados a escassez hídrica, eutrofização e toxicidade. Constatou-se que, embora o volume total de água na irrigação fosse adequado à necessidade da mangueira na região, as quantidades aplicadas em cada fase fenológica eram inadequadas e estavam provavelmente afetando a produtividade e o impacto negativo da cultura na escassez hídrica por quilograma de manga comercializada. Ponderou-se ainda que a prática da adubação verde entre plantas de mangueira poderia reduzir os impactos na eutrofização e toxicidade.

O estudo da pegada da uva produzida em diferentes bacias hidrográficas da costa Peruana (Vázquez-Rowe et al., 2017) mostrou as áreas produtoras com menor pegada hídrica, avaliada pelas categorias escassez hídrica, eutrofização e toxicidade. Nesse trabalho, também foi observado a ineficiência dos sistemas de irrigação por inundação praticados em fazendas de uva nessa região. Concluiu-se, ainda, que os locais com maior consumo de água não resultaram em maior impacto na escassez hídrica em razão da pouca propensão dessas regiões a esse problema. Os maiores impactos na eutrofização ocorreram nas áreas com maior aplicação

de fertilizantes nitrogenados e fosfatados, enquanto na toxicidade, nas áreas que utilizaram pesticidas com maior solubilidade em água.

Considerações finais

Embora a região semiárida sofra de forma geral com eventos de escassez hídrica, algumas bacias hidrográficas estão mais susceptíveis a esse problema que outras. Neste capítulo, demonstrou-se que as bacias com máxima escassez estão localizadas nas seguintes Unidades Hidrográficas Estaduais: i) Baixo Jaguaribe, no Ceará; ii) Longá, no Piauí; iii) Pontal, Terra Nova e G16, em Pernambuco, iv) Boqueirão, no Rio Grande do Norte; e v) Verde e Jacaré, Carnaíba de Dentro, Salitre e Verde Grande, na Bahia. Nessas bacias, destaca-se a produção de grãos (milho e feijão) e frutas (caju, coco, banana e uva).

Nesse contexto, ressalta-se a necessidade de avaliação em campo da real demanda hídrica dessas culturas nessas regiões, buscando-se avaliar a eficiência hídrica na irrigação. Nessas áreas, deve-se, também, intensificar a assistência técnica voltada para uso de ferramentas de gestão como a pegada hídrica e de tecnologias para redução do uso da água na irrigação.

Referências

- AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DO CEARÁ - ADECE. **Estudo técnico para a alocação de água destinada à irrigação**. Fortaleza, 2015. 130 p. Disponível em: <http://www.adece.ce.gov.br/index.php/agronegocio/estudo-das-aguas>. Acesso em: 1 jul. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília, DF, 2017. 85 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil – 2014: relatório síntese**. Brasília, DF: Embrapa: ANA, 2016. 33 p. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/arquivos/Projeto_Pivos.pdf. Acesso em: 15 set. 2018.
- ANDRADE, E. P.; NUNES, A. B. A.; UGAYA, C. M. L.; ALENCAR, M. C.; SANTOS, T. L.; BARROS, V. S.; PASTOR, A. V.; FIGUEIRÊDO, M. C. A. Water scarcity in Brazil: part 1 - regionalization of the AWARE model characterization factors. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 2342–2358, 2019. DOI: [10.1007/s11367-019-01643-5](https://doi.org/10.1007/s11367-019-01643-5).

- BOULAY, A. M.; BARE, J.; BENINI, L.; BERGER, M.; LATHUILLIÈRE, M. J.; MANZARDO, A.; MARGNI, M.; MOTOSHITA, M.; NÚÑEZ, M.; PASTOR, A. V.; RIDOUTT, B.; OKI, T.; WORBE, S.; PFISTER, S. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 2, p. 368-378, 2018. DOI: [10.1007/s11367-017-1333-8](https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8).
- BOULAY, A. M.; BARE, J.; CAMILLIS, C. de; DOLL, P.; GASSERT, F.; GERTEN, D.; HUMBERT, S.; INABA, A.; ITSUBO, N.; LEMOINE, Y.; MARGNI, M.; MOTOSHITA, M.; NÚÑEZ, M.; PASTOR, A. V.; RIDOUTT, B. SCHENCKER, U.; SHIRAKAWA, N.; VIONNET, S.; WORBE, S.; YOSHIKAWA, S.; PFISTER, S.; Consensus building on the development of a stress-based indicator for LCA-based impact assessment of water consumption: outcome of the expert workshops. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 5, p. 577-583, 2015. DOI: [10.1007/s11367-015-0869-8](https://doi.org/10.1007/s11367-015-0869-8).
- BROUWER, C.; PRINS, K.; HEIBLOEM, M. **Irrigation scheduling**. Rome: FAO, 1989. 66 p. (FAO. Irrigation Water Management. Training Manual, 4). Disponível em: <http://www.fao.org/tempref/agl/AGLW/fwm/Manual4.pdf>. Acesso em: 14 set. 2019
- CARNEIRO, J. M.; DIAS, A. F.; BARROS, V. S.; GIONGO, V.; MATSUURA, M. I. S. F.; FIGUEIRÉDO, M. C. B. Carbon and water footprints of Brazilian mango produced in the semiarid region. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 4, p. 735-752, 2019. DOI: [10.1007/s11367-018-1527-8](https://doi.org/10.1007/s11367-018-1527-8).
- CASTRO, A. L. A.; ANDRADE, E. P.; COSTA, M. A.; SANTOS, T. L.; UGAYA, C. M. L.; FIGUEIRÉDO, M. C. B. Applicability and relevance of water scarcity models at local management scales: Review of models and recommendations for Brazil. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 72, p. 126-136, Sept. 2018. DOI: [10.1016/j.eiar.2018.05.004](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.05.004).
- FIGUEIRÉDO, M. C. B.; BARROS, V. da S.; SANTOS, T. L.; GONDIM, R. S.; MATSUURA, M. I. S. F.; UGAYA, C. M. L. Pegada hídrica de produtos agrícolas: estudo de caso do melão amarelo. In: FIGUEIRÉDO, M. C. B.; GONDIM, R. S.; ARAGÃO, F. A. S. (org.). **Produção de melão e mudanças climáticas**: sistemas conservacionistas de cultivo para redução das pegadas de carbono e hídrica. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 187-209.
- FIGUEIRÉDO, M. C. B.; BOER, I. J. M. de; KROEZE, C.; BARROS, V. S.; SOUSA, J. A.; ARAGÃO, F. A. S.; GONDIM, R. S.; POTTING, J. Reducing the impact of irrigated crops on freshwater availability: the case of Brazilian yellow melons. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, p. 437-448, 2014. DOI: [10.1007/s11367-013-0630-0](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0630-0).
- FUNCEME. Disponível em: <http://www.funceme.br>. Acesso em: 4 ago. 2021.
- GONDIM, R. S.; SERRANO, L. A. L.; MAIA, A. H. N.; SILVA, J. P. Biocarvão na formação de um pomar de cajueiro. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS E MATÉRIA ORGÂNICA NATURAL, 12., 2017, Sinop, MT. **Anais [...]** Sinop, MT: Embrapa Agrossilvipastoril, 2017. 1 CD-ROM.
- IBGE. **Produção agrícola municipal 2016**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>. Acesso em: 16 ago. 2018.
- IBGE. **Produção agrícola municipal 2019**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>. Acesso em: 4 ago. 2021.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14046:2014**: environmental management: water footprint: principles, requirements and guidelines. Genebra, 2014.
- KARHU, K.; TUOMAS, M.; IRINA, B.; KRISTIINA, R. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 140, n. 1/2, p. 309-313, Jan. 2011. DOI: [10.1016/j.agee.2010.12.005](https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.005).
- MACEDO, A. B. M.; MIRANDA, F. R.; GONDIM, R. S. Análise econômica da bananeira ‘Pacovan Ken’ em função de diferentes tensões de água no solo. **Irriga**, v. 17, n. 3, p. 274-283, 2012. DOI: [10.15809/irriga.2012v17n3p274](https://doi.org/10.15809/irriga.2012v17n3p274).
- SANTOS, T. de L.; NUNES, A. B. A.; GIONGO, V.; BARROS, V. da S.; FIGUEIRÉDO, M. C. B. Cleaner fruit production with green manure: the case of Brazilian melons. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 260-270, Apr. 2018. DOI: [10.1016/j.jclepro.2017.12.266](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.266).
- SARAIVA, K. R.; VIANA, T. V. A.; BEZERRA, F. M. L.; COSTA, S. C.; GONDIM, R. S. Regulated deficit irrigation and different mulch types on fruit quality and yield of watermelon. **Revista Caatinga**, v. 30, p. 437-446, June 2017. DOI: [10.1590/1983-21252017v30n219rc](https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n219rc).
- SARVAS, M.; PAVLENDÁ, P.; TAKÁCOVÁ, E. Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations. **Journal of Forest Science**, v. 53, n. 5, p. 204-209, 2007.
- STEDUTO, P.; FAURÈS, J. M.; HOOGVEEN, J.; WINPENNY, J.; BURKE, J. **Coping with water scarcity**: an action framework for agriculture and food security. Rome: FAO, 2012. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/016/i3015e/i3015e.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2021.
- VÁZQUEZ-ROWE, I.; TORRES-GARCÍA, J. R.; CÁCERES, A. L.; LARREA-GALLEGOS, G.; QUISPE, I.; KAHHAT, R. Assessing the magnitude of potential environmental impacts related to water and toxicity in the Peruvian hyper-arid coast: a case study for the cultivation of grapes for Pisco production. **Science of the Total Environment**, v. 601/602, p. 532-542, Dec. 2017. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.05.221](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.221).
- WORLD ECONOMIC FORUM. **Global Risks 2015**. 10th edition, [Geneva], 2015. Disponível em: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_2015_Report15.pdf. Acesso em: 9 July 2021.

A crise ambiental no Semiárido

A perspectiva do pensamento sistêmico

Belinda Pereira Cunha

José Irivaldo Alves de Oliveira Silva

Introdução

Vive-se um momento no planeta que aponta para a necessidade de ações urgentes de preservação do meio ambiente. Contudo, os tomadores de decisão não agem com a velocidade compatível com essa urgência, justificando como atraso dessas ações, principalmente, os seguintes fatores: a falta de orçamento e de profissionais capacitados. Esse fato demonstra que os governos, especialmente os municipais, têm pouca capacidade em desenvolverem uma política ambiental local conecta com as novas demandas globais de preservação ambiental e compatível com modelos de desenvolvimento sustentável. Essas ações podem ser concretizadas ao se desenvolverem políticas públicas alinhadas a uma agenda ambiental urgente.

Não se pode negar a existência de uma crise ambiental, que demanda uma ação conjunta, sistêmica e integrada que envolve diversos atores, públicos e privados, os quais juntos devem decidir os caminhos a serem trilhados para solucionar esse problema. Nessa crise, há fenômenos originados da ação humana que não podem ser dissociados, tais como: a poluição, a escassez de água, a degradação do solo, o desmatamento, as queimadas, a extinção de espécies, a desertificação, a disposição de resíduos sólidos, a geração de energia, entre outros. Logo, esses fatos devem ser questionados para se elaborar um conjunto de ações que tenham como finalidade a preservação da vida. E essa é uma questão a ser enfrentada por intelectuais, estudiosos, pesquisadores e gestores públicos.

Com base nessas questões preliminares, este capítulo se desenvolve a partir da seguinte pergunta: é possível pensar os problemas ambientais do Semiárido brasileiro da forma tradicional, ou se faz necessário avançar-se para um viés analítico de caráter sistêmico? Assim o poder público é instado a apresentar soluções, pois tem grande parcela dessa responsabilidade.

Essa análise torna-se desafiadora quando se propõe estudá-la no contexto do Semiárido, região composta por diversos territórios, onde há escassez de recursos, especialmente de água. Num contexto de mudanças climáticas, esse processo de complexificação ambiental se agudiza.

Nesse contexto, Rodell et al. (2018) mapearam as regiões do mundo que sofrerão o impacto dessas mudanças, principalmente, nas reservas de água doce das regiões áridas e semiáridas. De acordo com a Figura 1, nas regiões em vermelho, a crise hídrica será crítica; e do alaranjado ao vermelho, a crise hídrica tende a piorar.

O Brasil, por exemplo, já vem sofrendo esses efeitos, notadamente na região de atuação da transposição do Rio São Francisco. Diante disso, é preciso um planejamento de políticas públicas ambientais voltadas para esse “novo” *estatus quo*, visando à formação de espaços resilientes.

O presente capítulo adotará uma abordagem crítica sociojurídica, numa visão transdisciplinar. Nele pontuará algumas evidências acerca da crise ambiental presente no cotidiano dos territórios do Semiárido, a qual será analisada no contexto de um pensamento sistêmico, para promover soluções socioambientais e sociotécnicas.

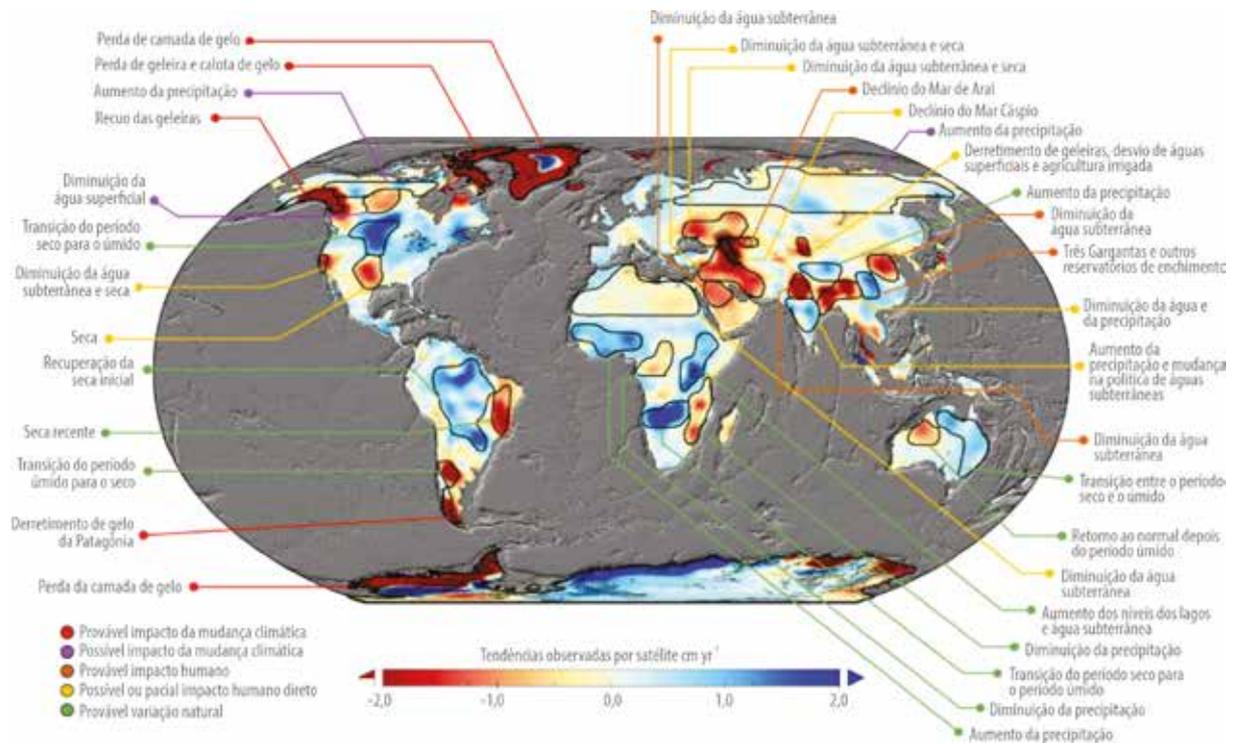


Figura 1. Efeitos das mudanças climáticas no estoque de água do Planeta.

Fonte: Rodell et al. (2018).

O pensamento sistêmico para o enfrentamento da crise ambiental

A crise ambiental surgida na modernidade questiona a racionalidade e os paradigmas teóricos que dão suporte ao crescimento econômico e ao desenvolvimento predominantes, o que teve consequências diversas como a degradação ambiental. Esse panorama serviu de fundamento para a necessidade de internalizar as bases ecológicas e novos arranjos jurídico-políticos e princípios sociais no tratamento dos recursos naturais. Nesse contexto, deu-se início um intenso debate político e teórico para a valorização da natureza e a internalização das “externalidades socioambientais” ao sistema econômico, havendo aqui um amplo processo de produção, apropriação e utilização de conceitos “ambientais” (Leff, 2002).

Emergiram novas estratégias de desenvolvimento baseadas nas condições e potencialidades dos ecossistemas e no manejo adequado dos recursos naturais, surgindo aqui a sustentabilidade ambiental como um critério normativo para a reconstrução da ordem econômica, questionando as bases da produção, sendo ela uma condição para o desenvolvimento duradouro e mesmo a sobrevivência humana (leff, 2001).

Na década de 1980, surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável como uma nova maneira de perceber a relação meio ambiente e desenvolvimento, prevendo uma proposta de equilíbrio entre a utilização dos recursos naturais e o desenvolvimento econômico. Ele se tornou o principal referencial utilizado pela comunidade internacional, os governos nacionais e grupos ambientais para o alcance de metas ecológicas (Sezgin, 2012), tendo tal modelo notável reflexo sobre as estruturas de governo e na política em geral (Bursztyn; Bursztyn, 2012). A noção de sustentabilidade passa a ganhar corpo e expressão política com a adjetivação do termo desenvolvi-

mento. Também passou a ter as dimensões social e econômica (Nascimento, 2012).

Não se está diante de um cenário simples. É preciso pensar que se está sob o paradigma do desenvolvimento sustentável, que deve ser uma matriz conceitual para dar conteúdo ambiental às políticas públicas em diversos setores. Considera-se também derivada dessa perspectiva a compreensão de convivência com o Semiárido, que permeia as políticas públicas que são traçadas para essa região.

Entretanto, é importante pontuar que o projeto global de desenvolvimento sempre passou por uma questão bem mais complexa e evidente: a superexploração da natureza. Resta saber o que os países desenvolvidos vão fazer quando não houver mais recursos naturais de onde “jorra leite e mel”. Porto-Gonçalves (2006, p. 62) pontua de forma percuscente essa noção de dominação da natureza como base desse modelo de desenvolvimento planetário:

A ideia de desenvolvimento sintetiza melhor do que qualquer outro projeto civilizatório, que tanto pela via liberal e capitalista, como pela via social-democrata e socialista, a Europa Ocidental acreditou poder universalizar-se. Desenvolvimento é o nome síntese da ideia de dominação da natureza. Afinal, ser desenvolvido é ser urbano, é ser industrializado, enfim, é ser tudo aquilo que nos afaste da natureza e que nos coloque diante de construtos humanos, como a cidade, a indústria. [...] A ideia de progresso é de tal forma parte da hegemonia cultural tecida a partir do iluminismo que mesmo aqueles que se consideram os maiores críticos da vertente burguesa da modernidade, isto é, do capitalismo, se reivindicam progressistas, e é com base nesses fundamentos que criticam os ambientalistas. Assim, progressistas de todos os matizes, dos liberais aos marxistas produtivistas, se apresentam criticamente diante dos ambientalistas.

Portanto, é preciso que já se estabeleça a lógica ainda presente nos modelos de desenvolvimento. Estes são ainda baseados numa defesa da dominação, controle, regulação da natureza, o que deixa a situação de crise mais evidente e que perpassa diversos contextos sociopolíticos e espaciais, refutando a ideia de que essa perspectiva estaria apenas no liberalismo. É verdade

que, numa sociedade de mercado, a busca por bens de consumo orienta esse modelo para um desgaste maior da base material do planeta, composta por água, solo, fauna e flora.

Dardot e Laval (2016) argumentam que há um processo de consolidação do homem empresarial, baseado na valorização da concorrência e da empresa como forma geral da sociedade. Nessa linha, não seria repetitivo mencionar que a própria natureza se transformaria em mercadoria, e que a lógica baseada no consumo permearia estratégias de políticas preservacionistas. Assim analisam o momento atual, Laval e Dardot (2016, p. 136):

Embora se considere típica de uma política neoliberal a construção de uma situação econômica que a aproxime do cânone da concorrência pura e perfeita, há outra orientação, talvez mais disfarçada ou menos imediatamente perceptível, que visa a introduzir, restabelecer ou sustentar dimensões de rivalidade na ação e, mais fundamentalmente, moldar os sujeitos para torná-los empreendedores que saibam aproveitar as oportunidades de lucro e estejam dispostos a entrar no processo permanente de concorrência. Foi particularmente no campo do *management* que essa orientação encontrou sua expressão mais forte.

É evidente que há conflitos entre a lógica de controle da natureza e a pretensão de proteção da natureza, ampliada para a proteção das suas funções ecológicas, o que foi conciliado com a ideia de desenvolvimento sustentável. A questão ambiental não trata apenas da compreensão das dimensões biológicas, químicas e físicas dos seres do planeta. Há outras dimensões que necessitam ser interligadas a estas, tais como a política, a sociologia, a antropologia, entre outros campos do saber que possam auxiliar no apontamento de soluções. Um pensamento fragmentado certamente não dará conta das crises, como se refere Leff (2006).

O movimento do pensamento sistêmico surge para contraditar a fragmentação do conhecimento em áreas, ou subáreas, para se enfrentar as crises contemporâneas. Essa perspectiva pode ser visualizada justamente na ecologia, na concepção de ecossistema, entendendo que

há um sistema de vida (uma teia da vida) mantendo relações interconectadas (Capra, 2006; Crepaldi et al., 2014). O pensamento sistêmico pode ser traduzido da seguinte forma:

A ênfase está nas relações e não nos objetos, ou seja, os próprios objetos são redes de relações, embutidas em redes maiores. O mundo vivo é entendido como uma rede de relações. O conhecimento científico é tido como uma rede de concepções e de modelos sem fundamentos firmes e sem que um deles seja mais importante do que outros. O mundo material é visto como uma teia dinâmica de eventos interrelacionados. (Crepaldi et al., 2014, p. 13).

Portanto, a compreensão de certos fenômenos precisaria passar por um entendimento mais holístico, sem propriamente a dicotomia tradicionalista da ciência entre sujeito e objeto, compreendendo-se que há uma rede de relações. Isso se coaduna muito bem com o meio ambiente que encerra em si um conjunto extraordinário de organismos que estão, na verdade, interligados, sendo imprescindível outro olhar para compreender e daí traçar políticas públicas e normas jurídicas que contemplem essa complexidade.

A Figura 2¹ traduz graficamente como se vislumbra o pensamento sistêmico, uma verdadeira

teia de inter-relações. Isso se apresenta muito em consonância quando se fala em funções ecológicas da natureza, ou seja, a representação clara de que todos os elementos da natureza são essenciais para o funcionamento dessa sofisticada “engrenagem” que sofre com uma análise mecanicista, individualizada, cartesiana. Portanto, a ecologia estaria mais próxima desse pensamento sistêmico, como mencionado no trecho abaixo.

A Ecologia, uma das vertentes do Pensamento Sistêmico, emerge da Escola Organísmica da Biologia quando biólogos começaram a estudar comunidades de organismos. O foco estava colocado no estudo das relações que interligam os organismos. A concepção de ecossistema moldou todo o pensamento ecológico a partir de então e promoveu uma abordagem sistêmica da ecologia. (Crepaldi et al., 2014, p. 6)

A Constituição Federal brasileira deixa clara essa visão sistêmica no art. 225 (Brasil, 1988, grifo do autor):

Art. 225. Todos têm direito ao **meio ambiente ecologicamente equilibrado**, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de

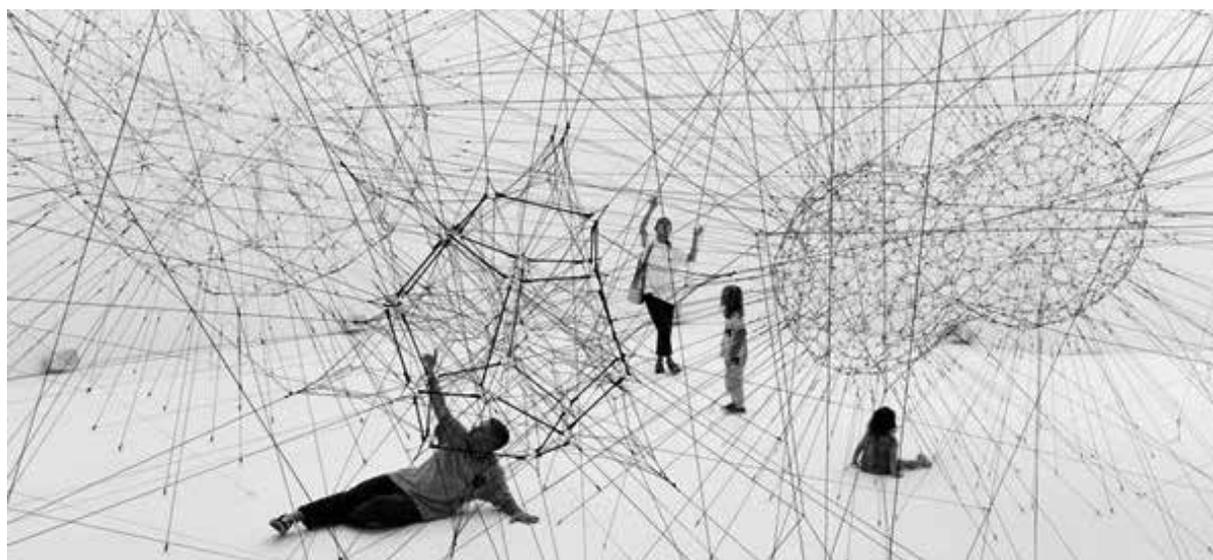


Figura 2. Representação gráfica do pensamento sistêmico.

¹ Algo-r(h)i(y)thms, Tomás Saraceno. Disponível em: <https://medium.com/torustimelab/comprometimento-social-no-pensamento-sistêmico-30367fb38a60>.

defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

§ 1º Para assegurar a efetividade desse direito, incumbe ao Poder Público:

I - preservar e restaurar os **processos ecológicos** essenciais e prover o manejo ecológico das espécies e **ecossistemas**;

Dessa forma, “meio ambiente ecologicamente equilibrado”, “processos ecológicos” e “ecossistemas” dão pistas da necessidade de o tratamento dessas questões ser realizado de uma maneira não tradicional, mas sistêmica, e que, certamente, deve haver um diálogo entre diferentes áreas do saber para que se atinja esse desiderato.

Há um aquecimento global, provocando uma mudança climática, que compromete o estoque de água da Terra e o ciclo hidrológico, o que repercute em diversos outros sistemas. O conceito de ecologia deve ser resgatado para compreensão da extensão dos danos causados por poluidores ao meio ambiente. O direito tem a tarefa de tentar aglutinar a complexidade dessas relações de modo a se aproximar de um sistema normativo que contextualize o meio ambiente de forma também sistêmica.

Crise ambiental no Semiárido: um cenário complexo

A visão que se tem de Semiárido muitas vezes é de uma paisagem pobre, sem beleza, solo sem nutrientes, pouca riqueza de fauna e flora (Figura 3). Equivocadamente, a Constituição Federal brasileira não tem em seu texto o bioma Catinga como patrimônio nacional. Assim está o texto no § 4º do art. 225 (Brasil, 1988):

A Floresta Amazônica brasileira, a Mata Atlântica, a Serra do Mar, o Pantanal Mato-Grossense e a Zona Costeira são patrimônio nacional, e sua utilização far-se-á, na forma da lei, dentro de condições que assegurem a preservação do meio ambiente, inclusive quanto ao uso dos recursos naturais.

Essa ausência no texto constitucional faz parecer que, no mínimo, desconsidera o valor ecossistêmico desse bioma, conseqüentemente da complexidade de sua fauna e flora. Nele há uma diversidade de animais e vegetação que ainda está sendo catalogada. Talvez a sua paisagem acinzentada induza os desavisados ao erro, pensando que não há vida nesse espaço. Coelho et al. (2007) apresentam parte da riqueza vegetal dessa paisagem semiárida: uma quantidade considerável de espécies de plantas, de frutas típicas da região, todas adaptadas às condições do clima da região.



Figura 3. Região do Semiárido brasileiro.

A partir da década de 1950, muda substancialmente a forma como o Estado concebe o Nordeste e lida com a seca, visto que vários problemas antes associados a esse fenômeno passam a ser tratados como vinculadas à estrutura socioeconômica da região. Começa, nos anos 1960–1970, uma série de políticas modernizantes engendradas pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (Sudene). Havia uma concepção de “modernização econômica e tecnológica” como base para o desenvolvimento regional (Silva, 2007), sendo que a modernização industrial e agrícola era entendida como desenvolvimento e instrumento de redução das disparidades regionais (Rocha; Bursztyjn, 2007).

Na década de 1970, as políticas governamentais passaram a privilegiar a implantação de polos de modernização agrícola e pecuária, com amplo apelo pelas atividades da agricultura irrigada, com especialização na fruticultura para exportação (Silva, 2007). Ainda nesse período, na agricultura foram incentivados os sistemas de alta produtividade, como polos de irrigação no Vale do São Francisco e outras áreas. O Estado, nesse caso, intervencionista, buscou dirigir a modernização por meio do sistema de crédito, cooperativismo e extensão rural vinculados a pacotes tecnológicos estranhos à produção rural familiar (Lindoso, 2013). Entre 1999 e 2000, o desenvolvimentismo buscou modernizar o “pequeno produtor” sertanejo e tirá-lo da vulnerabilidade. Para tanto foram formulados o Projeto Sertanejo e o Projeto Nordeste (1970 e 1980), que foram pouco eficazes (Lindoso, 2013).

Mesmo com o projeto de modernização empreendido pelo Estado na década de 1960, os indicadores ainda apontavam para a persistência de uma economia tradicional e estagnada no Semiárido. Tudo isso em paralelo à situação de pobreza que ainda deflagrava uma crise social nas estiagens prolongadas. Ao mesmo tempo, observava-se o agravamento das problemáticas ambientais com os processos de desertificação e de poluição de bacias hidrográficas na região. Na década de 1980, multiplicavam-se as críticas e denúncias da sociedade civil acerca do abandono da população rural e das práticas de emergências, fragmentadas e clientelistas (Silva, 2007).

Nesse contexto, surge um novo discurso sobre a realidade regional e as alternativas sustentáveis de desenvolvimento do Semiárido, o que foi engendrado por um conjunto de organizações não governamentais (ONGs) que operam na região, com alguns órgãos públicos de pesquisa e extensão rural, como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (Emater), que juntas passaram a desenvolver atividades baseadas na ideia de uma convivência com a seca (Silva, 2003). Essa noção era fundamentada em conceitos ambientais, especialmente aqueles relacionados à sustentabilidade am-

biental e ao desenvolvimento. Nesse panorama, o combate às secas entra em descrédito, e os programas governamentais passam a utilizar esse discurso da sustentabilidade (Silva, 2007).

O documento *Convivência do homem com a seca*, de 1982, lançado pela Embrapa e a Emater, e a *Declaração do Semi-árido*, criada em 1999, pela Articulação do Semiárido (ASA), são marcos dessa ideia que afirma a possibilidade de convivência com as condições do Semiárido brasileiro (Silva, 2003).

As discussões sobre a emergência de um novo paradigma da sustentabilidade têm contribuído para a construção da perspectiva acerca da “qualidade de vida no Semiárido brasileiro”. Nesses termos, a região é entendida como um complexo de ecossistemas com seus devidos limites e possibilidades. Um espaço onde devem ser construídas ou resgatadas as relações de convivência entre o ser humano e a natureza, articulando sustentabilidade ambiental, qualidade de vida e o incentivo às atividades econômicas apropriadas. Essa perspectiva de convivência implica um amplo processo cultural, de educação, de uma nova relação com o meio ambiente, dos seus limites e potencialidades. Requer a construção de novas formas de pensar, sentir e agir de acordo com as características da região (Silva, 2003).

Chacon e Bursztyn (2005) explicam que à medida que o conceito de desenvolvimento sustentável se fortifica e integra cada vez mais o discurso político no Brasil, a seca passa a ser tratada paulatinamente como um problema ecológico, mudando o enfoque das políticas públicas. Há uma internalização da proposta de convivência com a seca e o Semiárido no discurso político, que agora preconiza a necessidade da gestão dos recursos hídricos para a promoção do desenvolvimento sustentável e a diminuição da pobreza no Semiárido, no entanto, instrumentalizando-o como recurso de poder.

Esse paradigma da convivência passou a orientar e servir de base para uma série de políticas sobre o Semiárido, mesmo aquelas iniciativas que pretendem uma promoção do desenvolvimento. Exemplos disso são o Plano Estratégico

de Desenvolvimento Sustentável do Nordeste (Brasil, 2016) e o Plano Estratégico de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido (Brasil, 2005), que reconhecem e orientam algumas das suas ações com base em princípios e conceitos ambientais. Esses dois planos, tal como a consideração da perspectiva da convivência com a seca em políticas para o Semiárido, expressam um processo de ecologização de ações e projetos estatais (Silva, 2016).

Daí dizer-se que o Semiárido brasileiro é um ambiente de complexidade, constatando-se que não há como analisar a dinâmica ambiental sem considerar o caráter socioambiental das políticas públicas, perpassadas por variáveis que forjam os sentidos que realizam uma resignificação no tempo dos arranjos ocorridos nesses diversos territórios, inclusive em face do sentido empregado a ‘desenvolvimento’.

Esse atual paradigma da convivência implica em aceitar as condições climáticas dessa região. Por sua vez, as políticas não têm mais foco no combate e sim numa espécie de resiliência e adaptação, desde que haja um aporte do poder público de atuações diversas para contemplar o sentido elástico, ou multifacetado, de desenvolvimento sustentável, com políticas de incentivo à agricultura familiar, à segurança hídrica, ao combate da desertificação, à recuperação do solo, à assistência técnica ao agricultor para que ele possa empregar o conhecimento numa lavoura mais produtiva e menos agressiva ao ambiente.

Antes, tinha-se um paradigma baseado num pensamento linear de combate à seca com foco específico na segurança hídrica. Porém, isso se transformou em um paradigma complexo, baseado num pensamento sistêmico, que não considera a falta de água como o único problema; é o fortalecimento do papel do território, da noção de pertencimento ao local, da permanência dos povos do Semiárido nessa região, embora com o avanço das pesquisas e a exata noção da mudança climática e o recrudescimento das condições de vida, podendo produzir não deslocados por falta de emprego, mas deslocados ambientais. Isso destoa de uma visão linear,

simplicista e de unicidade de paisagens. A transição do combate para a perspectiva de convivência gera uma diferença, principalmente de percepção, como afirma Silva (2003, p. 365), resignificando e evidenciando a:

[...] existência das conexões entre do combate à seca com as bases do atual modelo civilizatório de desenvolvimento: a concepção mecanicista de explicação de fenômenos naturais, a perspectiva tecnicista de domínio humano sobre a natureza e a finalidade economicista de exploração e produção de riquezas como parâmetro de desenvolvimento. Também foram explicitadas algumas conexões entre a perspectiva de convivência com o semi-árido com um novo paradigma do desenvolvimento sustentável que está ainda em construção, com destaque para os seguintes aspectos: a percepção de complexidade informando o conhecimento da realidade; a busca do equilíbrio entre meio ambiente e produção de riquezas; a satisfação das necessidades e renovação das aspirações humanas como finalidade do desenvolvimento.

Não que isso venha resolver os problemas do Semiárido, mas a mudança de compreensão faz com que haja uma modificação, talvez positiva, nos rumos de uma política pública. A complexidade sistêmica do Semiárido é tão evidente que, mesmo na ausência da água, os sistemas de vida praticamente hibernam e, quando volta a chover, logo a paisagem sofre um esverdeamento.

O erro talvez esteja em comparar o ecossistema de regiões áridas e semiáridas com o de uma floresta tropical. Acaba sendo um parâmetro equivocado, uma vez que fazem parte de sistemas que compõem o meio ambiente e estão interligados. O desconhecimento da complexidade do Semiárido pode causar prejuízos como os que Silva (2003, p. 367) menciona:

O desconhecimento da complexidade do semi-árido conduziu à introdução de práticas agropecuárias inadequadas, provocando ou agravando desequilíbrios ambientais. Estudos realizados pelo Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2002) indicam que 68% da área está antropizada, sendo 35,3% extremamente antropizada. Além disso, as maiores áreas brasileiras que sofrem processo de desertificação estão localizadas nessa região.

O próprio Estado fez suas escolhas em relação ao meio ambiente. No momento de priorizar a destinação de recursos, de orçamento para o desenvolvimento de políticas públicas ambientais, certamente a Amazônia teve mais importância, considerando que midiaticamente esse ecossistema sempre foi vinculado à sustentação da vida, como na época em que foi considerada “pulmão” do mundo. Talvez o seu caráter transnacional ajudou nesse destaque dado por países desenvolvidos que enxergam nela uma grande fonte de riquezas e parte fundamental do equilíbrio ambiental global.

Além disso, numa perspectiva ampliada de meio ambiente, é preciso pensar de forma sistêmica ainda as relações entre fauna, flora, zona rural e cidades. E, nesse “pacote”, os seres humanos devem ser incluídos, pois o Semiárido é a maior região do mundo com baixa pluviosidade e vegetação xerófila e a mais povoada (Silva, 2003). Esse fato torna mais relevante a ação pública na implementação de políticas mais holísticas que visem reunir as condições necessárias para aliar ocupação humana e natureza. Nesse contexto, têm-se cidades de médio porte inseridas no Semiárido – como Campina Grande, PB; Petrolina e Caruaru, PE; Juazeiro, BA; Juazeiro do Norte e Sobral, CE; Mossoró, RN, entre outras –, que representam um grande contingente populacional.

É importante afirmar que boa parte das políticas desenhadas e postas em prática no Semiárido acaba não dialogando entre si. O eixo da convivência foi o que houve de mais novo na história recente da região, talvez sendo uma espécie de “amalgama”, que liga diversos projetos e programas públicos. No entanto, não se verifica um discurso diferenciado por parte dos agentes políticos, ainda muito focados na matriz tradicional do desenvolvimentismo como crescimento, tendo a dimensão da sustentabilidade muito mais como retórica ambientalista do que qualquer outra coisa.

Entretanto, o Instituto Nacional do Semiárido (Insa) e a Embrapa têm capitaneado uma discussão que visa usar tecnologia e inovação para por em prática o princípio constitucional

do “meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida”, estabelecido no art. 225 (Brasil, 1988). Existem ainda organismos de representação da sociedade civil como a ASA, que tem a sustentabilidade como um de seus pilares.

Os serviços ambientais na realidade complexa do Semiárido

Diante dessa realidade urbana e rural do Semiárido, parece que esses territórios ainda não ingressaram na discussão contemporânea dos serviços ambientais. Ouve-se mais falar nesse aspecto em relação à Amazônia. Na verdade, o Nordeste, especialmente o Semiárido, repousa sobre um discurso em desconexão com a contemporaneidade ambiental. Apregoa-se, ainda, o modelo desenvolvimentista, afirmando-se a necessidade de se industrializar essa região para que possa fazer parte do rol de regiões relevantes do país. Ainda vige uma visão utilitarista, sendo necessário desbravar fronteiras que possuam recursos naturais a serem explorados.

Busca-se uma conciliação entre o paradigma desenvolvimentista a partir da noção de serviços ambientais. Porém, diante da complexidade da crise ambiental, a busca por instrumentos que de alguma forma mitiguem os efeitos deletérios da intervenção humana na natureza é bem-vinda. Segundo Garcia et al. (2015, p. 30, grifo do autor): “**Bens e serviços ecossistêmicos ou serviços ambientais** (*ecosystem services*) são os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas [...]”. Além disso, é preciso pensar também “[...] que eles englobam tanto os serviços proporcionados ao ser humano por ecossistemas naturais (os serviços ecossistêmicos), quanto os providos por ecossistemas manejados ativamente pelo homem” (Brasil, 2011, p. 17). Também poderiam ser definidos como a tentativa de valoração dos benefícios ambientais, principalmente em relação à manutenção

de áreas naturais pouco alteradas pela ação humana e seus benefícios para o conjunto da sociedade (Brasil, 2009).

Acredita-se que seja uma noção bem compreensível, contemporânea, por entender que a natureza presta um serviço para todos. Claro e evidente que se trata de um instrumento que não vem quebrar a hegemonia da lógica do mercado. Pelo contrário, tenta achar uma fórmula que possa contrabalançar a atuação humana e a fruição dos recursos naturais.

Entretanto, é preciso trazer à baila a definição de ecossistema dada na *Eco 92*, no Rio de Janeiro, na *Convenção sobre diversidade biológica*, no art. 2º (Brasil, 2002): “Ecossistema significa um complexo dinâmico de comunidades vegetais, animais e de microorganismos e o seu meio inorgânico que interagem como uma unidade funcional”. Portanto, assiste razão para o entendimento de que os organismos desempenham uma função que tem repercussões entre eles próprios e surtem efeitos positivos para a humanidade. Então, há uma prestação de serviço por parte dos ecossistemas. Assim está disposto em documento oficial do órgão máximo ambiental brasileiro (Brasil, 2011, p. 17):

Nos ecossistemas ocorrem diversos processos naturais, que resultam das complexas interações entre os seus componentes bióticos (organismos vivos) e abióticos (componentes físicos e químicos) por meio das forças universais de matéria e energia. Esses processos naturais garantem a sobrevivência das espécies no planeta e têm a capacidade de prover bens e serviços que satisfazem necessidades humanas direta ou indiretamente.

Na Tabela 1, apresentam-se as modalidades desses serviços ambientais ou ecossistêmicos.

A própria inserção de uma prática baseada num serviço ecossistêmico traduz a necessidade de se tratar a relação entre natureza e humanidade de forma complexa. E por que isso não seria factível no Semiárido? A complexidade e o tamanho dessa região, lembrando que ela está aumentando, demanda uma nova postura, ou melhor, necessita-se de instrumentos eficazes para recuperar e mesmo estagnar o processo

de devastação e seus efeitos, dentre os quais a desertificação.

A transformação dessa relação entre natureza e aquele que a explora em pagamento de serviços ambientais (PSA) trata-se de uma maneira de não colapsar, ou inviabilizar, o modelo de desenvolvimento, pensando-se em uma contrapartida ou em um novo olhar para essas relações com o mercado. Para ilustrar, já existem diversas iniciativas de PSA no Semiárido. A seguir, elencam-se algumas potencialidades:

Sistemas agrossilvipastoris – trata-se de culturas associadas entre lavouras diversas e criação de animais num mesmo espaço. O que implica na otimização do espaço e na renovação do solo com a produção de material orgânico. Estudos apontam a necessidade de conjugar essa prática com situações de degradação ambiental, ou seja, escolher regiões que sofrem com o desmatamento, com a desertificação, com destruição das nascentes, só para citar alguns que podem ser alvo do PSA. O bioma Caatinga é uma possibilidade concreta na aplicação do PSA, de modo a restaurar suas funções ecossistêmicas. Daí pode haver um processo interessante de reflorestamento, deposição de matéria orgânica, sequestro de carbono, entre outros serviços de “ressarcimento” ao meio ambiente.

Sequestro de carbono – há experiências que demonstram que o nível de carbono retirado da atmosfera tem sido satisfatório nas faixas de Caatinga preservada, não sendo verificado o mesmo desempenho em regiões com interferência antrópica (Araújo et al., 2017). O estudo de Costa et al. (2011) aponta a potencialidade do Semiárido no que se refere ao sequestro do carbono, sendo um bioma que pode contribuir consideravelmente para esse serviço ecossistêmicos. Nessa esteira, também constata o subaproveitamento dessa potencialidade na região. Barbeiro et al. (2009) também comprovaram o potencial da Caatinga em sequestrar carbono.

Proteção de nascentes, das margens e da vegetação – É uma medida para que a água flua

Tabela 1. Classificação dos serviços ambientais.

| Tipo de serviço ambiental | Definição e exemplos |
|---------------------------|---|
| Serviços de suporte | Propiciam as condições necessárias para que os demais serviços possam ser disponibilizados à sociedade. Os benefícios ocorrem, em sua maioria, de maneira indireta, e se manifestam em longo prazo, como a formação e a manutenção da fertilidade do solo, a produção de oxigênio, a ciclagem de nutrientes e a produção primária, que estão na base do crescimento e da produção. Exemplos: manutenção da biodiversidade, manutenção do ciclo de vida (ciclagem de nutrientes e da água/fotossíntese), formação do solo |
| Serviços de provisão | Compreendem os produtos obtidos dos ecossistemas e que são oferecidos diretamente à sociedade, como alimentos e fibras naturais, madeira para combustível, água, material genético, entre outros. Exemplos: alimentos fibras/madeira, recursos genéticos, recursos medicinais, recursos ornamentais, água potável |
| Serviços de regulação | Englobam os benefícios obtidos pela sociedade a partir da regulação natural dos processos ecossistêmicos, tais como a manutenção da qualidade do ar e o controle da poluição, por meio da regulação da composição dos gases atmosféricos; a regulação do clima; a regulação dos fluxos de água (ciclo hidrológico) e o controle das enchentes, evitando inundações e contribuindo para a recarga dos aquíferos; o controle da erosão; a purificação da água; a redução da incidência de pragas e doenças pelo controle biológico; a regulação de danos naturais e a polinização de plantas agrícolas e silvestres. Exemplos: regulação da qualidade do ar, regulação do clima (incluindo sequestro de C), regulação dos fluxos de água (enchente/seca), purificação da água, fertilidade do solo, prevenção da erosão, controle biológico (doenças/pragas), polinização, prevenção de desastres, controle de resíduos |
| Serviços culturais | São os benefícios não materiais obtidos dos ecossistemas, que contribuem para o bem-estar da sociedade, como enriquecimento espiritual e cultural, desenvolvimento cognitivo, reflexão sobre os processos naturais, oportunidades de lazer, ecoturismo e recreação. Exemplos: valores estéticos (paisagem), recreação e turismo, valores espirituais e religiosos, valores educacionais/culturais |

Fonte: Adaptado de Garcia et al. (2015).

normalmente quando de sua chegada, ou mesmo quando se trata de rios perenes como o São Francisco. É importante destacar que o objetivo final dessas ações é propiciar o acesso à água. Para isso é imprescindível a conservação do solo e da vegetação (Chacon et al., 2005). Essa ação coordenada de proteção do solo, da vegetação e da água proporciona a conservação dos estoques desta última e regulação do seu nível para evitar enchentes e outros desastres. Segundo Bursztyn et al. (2015), num processo de produção de serviços ambientais relacionados com a água, é fundamental e básico: aumentar a co-

bertura vegetal nas sub-bacias hidrográficas e implantar microcorredores ecológicos; reduzir os níveis de poluição difusa rural decorrentes dos processos de sedimentação e eutrofização e de falta de saneamento ambiental; difundir o conceito de manejo integrado de vegetação, solo e água nas bacias hidrográficas por meio de incentivos financeiros aos proprietários rurais. Isso tem relação direta com a disponibilidade de água e sua qualidade nas cidades, sendo fundamental esse tipo de serviço para a melhoria desses indicadores.

Crise hídrica no Semiárido: problema pontual ou sistêmico?

Na última seção deste capítulo, tratar-se-á de um elemento fundamental e sistêmico ao Semiárido, a crise hídrica, tendo como finalidade apontar caminhos para um processo de resiliência ambiental. Isso inclui modos e tecnologias de superar essa crise hídrica tão propagada e pouco tratada de forma sistêmica e complexa. Desse modo, inicialmente é preciso reconhecer que, diante das mudanças climáticas em curso, constata-se um processo de escassez de chuvas mais longo e que exige políticas mais constantes, interconectadas, com atores interconectados e formação com fortalecimento de redes. Isso dependerá da formulação e implementação de políticas públicas fruto de um pensamento complexo e sistêmico em relação à mitigação desses efeitos em face do grande contingente populacional da região e de seus ecossistemas.

Está-se sob a égide dos efeitos iniciais da famosa obra de infraestrutura hídrica, a transposição do Rio São Francisco, que veio com a promessa de acabar com a escassez hídrica, mitigando substancialmente os efeitos dessa. Hoje o panorama é o seguinte: eixo leste funcionando com diversos problemas, sem clareza na gestão, com obras complementares, com problemas no que se refere ao saneamento e abastecimento de água, problemas na fiscalização quanto ao uso irregular das águas vertidas pelo canal; e o eixo norte iniciando seu funcionamento. A referida obra está pautada em uma mesma lógica de política pública linear, como se a questão fosse apenas de transpor água de um grande manancial para as regiões semiáridas nordestinas, esquecendo-se da governança e gestão dos múltiplos usos da água. Outrossim, a questão dessa região permeia também a capacidade produtiva a partir da escassez e da disponibilidade de água.

É preciso muito mais para compreender essa questão da escassez de água no Semiárido e encontrar possíveis soluções. Já houve outros projetos e programas, tais como açudagem, represas, poços, cisternas, dessalinização, que reforçam o caráter complexo da questão e da necessidade de uma rede de soluções complementares, e ao que parece nenhuma com a capacidade de resolver a escassez hídrica de forma definitiva.

Principalmente, quando se pensa num Brasil onde as políticas públicas são setorializadas, em que uma não se comunica com a outra, onde, pasmem, a política hídrica não se integrada plenamente com a política de saneamento, por exemplo. Tem-se um conjunto de políticas públicas nessa seara que estão consolidadas em leis, porém, com um baixo nível de implementação e avaliação. A transposição do Rio São Francisco é um exemplo dentre tantos outros que não ficou pronta a contento, pois seu funcionamento e gestão ainda não estão claros.

Documentos oficiais têm demonstrado o déficit que existe no campo hídrico e de saneamento, considerando que há um trinômio a ser pensado: quantidade, qualidade de água e uso/ocupação do solo². Essas dimensões têm relação direta com a Política Nacional de Saneamento Básico –PNSB (Lei nº 11.455/2007), que se trata de uma política pública complexa, composta pelo acesso à água potável, o esgotamento tratado, a disposição final e correta de resíduos sólidos, a drenagem e a limpeza urbana. Essas dimensões se complementam e possuem uma inter-relação imbricada com impacto na quantidade e na qualidade da água nos centros urbanos.

O campo precisa ser também incluído no esforço de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH (Lei nº. 9.433/1997)³ e da PNSB, pois não se deve considerar a água e o saneamento separados, embora, para sua

² Lei n. 13.465/2017. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13465.htm.

³ Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm.

administração, seja fundamental a unidade sistêmica conhecida como bacia hidrográfica. Isso se faz necessário em virtude da poluição que ocorre no campo, seja pelos grandes empreendimentos do agronegócio, seja por agricultores que não aplicam ou não possuem acesso às informações e tecnologias para o descarte dos seus resíduos.

Dados do Portal da Transparência⁴ atestam que há um investimento insuficiente da União nos estados em relação ao saneamento rural, e se evidencia a adoção de uma estratégia focada nas cidades, cuja destinação de recursos orçamentária é superior, porém insuficiente para a adoção de medidas necessárias para uma PNSB condizente com as necessidades, principalmente com a universalização dos serviços. É necessário que haja uma rede entre os atores para que possam dialogar de formar a traçar metas e ações conjuntas para proteção dos mananciais e conservação da água.

Dessa forma, uma suposta solução focada seja na açudagem, seja em poços, seja em cisternas, seja na transposição de rios para o Semiárido, precisa ter uma correspondente ação em outros setores que são fundamentais para que os múltiplos usos da água se efetivem. Esses megaprojetos hídricos encontram cidades e zonas rurais despreparadas para receberem as águas, bem como para reutilizá-las, visto que se está diante de um recurso finito e que se precisa empregar tecnologias para reinserir a água no ciclo urbano desta. O que se verifica é mais do mesmo, quando se começa a solução pelo fim e não pelo começo, quando o lógico seria preparar os territórios para receberem a água e a utilizar da melhor forma possível aumentando a capacidade de resiliência no Semiárido. Na Tabela 2 é possível visualizar como é deficitário o sistema de coleta e tratamento de esgotos no País.

É possível perceber que a estrutura de uma das dimensões da PNSB no Brasil ainda é muito deficitária. Coleta-se pouco esgoto, e se tratam pouco os resíduos, o que faz a população ser de-

pendente de uma água cada vez mais escassa e não saber reaproveitar a potencialidade que se tem vinda dos esgotos, em que a grande parte de seu conteúdo é formada por água, sendo o reúso fundamental.

Essa política deveria estar também conectada com outra medida fundamental que antecede a todas, tanto em sua essencialidade, como em cronologia, que é a Política Nacional de Meio Ambiente – PNMA (Lei nº 6.938/81)⁵. É dela que emanam os balizadores para uma PNSB ou uma PNRH, e não se verifica a atuação do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) por meio dos órgãos ambientais, a não ser para discutir e expedir o licenciamento ambiental.

Isso acaba se transformando em uma atividade meramente cartorária, destituída de uma discussão mais relevante em termos de planejamento de políticas que interliguem saneamento e meio ambiente, afinal estão intimamente ligadas e são essenciais para o bem-estar da sociedade nas suas cidades e para a qualidade dos ecossistemas.

Outra questão importante é saber como estão sendo implementadas as ações do Programa de Revitalização do São Francisco (PRSF), uma vez que delas depende a preservação do ciclo hídrico nesse manancial federal, preservando-se a nascente na Serra da Canastra, em Minas Gerais, as margens, as áreas de preservação permanente (APPs), realização da coleta e disposição correta dos resíduos sólidos (Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS; Lei nº 12.305/2010)⁶ e implementação do saneamento básico. Está-se falando de um grande rio brasileiro que já tem sido usado em larga escala para geração de energia, para o fornecimento de água, para a diluição de efluentes dos esgotos das cidades, para a agricultura, entre outros usos.

Quanto à necessidade de preservar o rio, a recente modificação do Código Florestal Brasilei-

⁴ Coleta de dados em 2018, para os anos de 2015, 2016 e 2017. Disponível em: www.portaldatransparencia.gov.br

⁵ Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm.

⁶ Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.

Tabela 2. Coleta e tratamento de esgoto no Brasil.

| Região geográfica | Unidade da Federação | Número de municípios | População urbana (em mil. hab.) | Parcela da população atendida | | Parcela tratada em relação à coletada (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------|---|
| | | | | Coleta de esgoto (%) | Tratamento de esgoto (%) | |
| Norte | Acre | 22 | 562,8 | 35 | 33 | 94 |
| | Amapá | 16 | 658,8 | 7 | 7 | 92 |
| | Amazonas | 62 | 3.014,2 | 22 | 19 | 84 |
| | Pará | 144 | 5.611 | 9 | 4 | 45 |
| | Rondônia | 52 | 1.277,3 | 9 | 15 | 41 |
| | Roraima | 15 | 374,1 | 19 | 15 | 79 |
| | Tocantins | 139 | 1.169,2 | 30 | 29 | 96 |
| | Total | 450 | 12.667,4 | 16 | 12 | 75 |
| Nordeste | Alagoas | 102 | 2.426,1 | 26 | 17 | 64 |
| | Bahia | 417 | 10.865 | 63 | 51 | 81 |
| | Ceará | 184 | 6.569,3 | 44 | 40 | 91 |
| | Maranhão | 217 | 4.283,4 | 17 | 4 | 23 |
| | Paraíba | 223 | 2.956,4 | 59 | 43 | 72 |
| | Pernambuco | 185 | 7.383,6 | 45 | 27 | 61 |
| | Piauí | 124 | 2.096,9 | 12 | 10 | 81 |
| | Rio Grande do Norte | 167 | 2.619,7 | 31 | 25 | 80 |
| | Sergipe | 75 | 1.616,8 | 32 | 22 | 67 |
| Total | 1.794 | 40.817,4 | 43 | 32 | 74 | |
| Sudeste | Espírito Santo | 78 | 3.136,5 | 61 | 41 | 68 |
| | Minas Gerais | 853 | 17.705 | 86 | 44 | 51 |
| | Rio de Janeiro | 92 | 15.922,1 | 73 | 42 | 58 |
| | São Paulo | 645 | 40.521,4 | 87 | 64 | 74 |
| | Total | 1.668 | 77.285 | 83 | 54 | 65 |
| Sul | Paraná | 399 | 9.397,5 | 65 | 64 | 98 |
| | Rio Grande do Sul | 497 | 9.477,2 | 54 | 26 | 48 |
| | Santa Catarina | 295 | 5.557,4 | 33 | 24 | 74 |
| | Total | 1.191 | 24.432,1 | 54 | 40 | 75 |

Continua...

Tabela 2. Continuação.

| Região geográfica | Unidade da Federação | Número de municípios | População urbana (em mil. hab.) | Parcela da população atendida | | Parcela tratada em relação à coletada (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------|---|
| | | | | Coleta de esgoto (%) | Tratamento de esgoto (%) | |
| Centro-Oeste | Distrito Federal | 1 | 2.694,3 | 83 | 83 | 100 |
| | Goiás | 246 | 5.801,9 | 50 | 48 | 95 |
| | Mato Grosso | 141 | 2.617,2 | 25 | 22 | 91 |
| | Mato Grosso do Sul | 79 | 2.170,4 | 43 | 42 | 98 |
| | Total | 467 | 13.283,4 | 51 | 49 | 97 |
| Brasil | | 5.570 | 168.485,3 | 247 | 187 | 386 |

Fonte: Agência Nacional de Águas (2017).

ro (Lei nº 12.651/2012) alterou a regulação das APPs, permitindo a ação antrópica numa faixa de terra maior, “determinou que a intervenção ou a supressão de vegetação nativa em Área de Preservação Permanente poderá ser autorizada nas hipóteses de utilidade pública, de interesse social ou de baixo impacto ambiental” (Azevedo et al., 2014, p. 72). Isso fragilizou mais ainda a regulação ambiental, dando espaço à exploração econômica sem o devido zelo, e em desacordo com o princípio da precaução e do poluidor pagador.

Agrava-se mais ainda quando se pensa no desenho institucional brasileiro, que é uma federação e que a União, os estados, os municípios e o Distrito Federal possuem suas competências em relação às temáticas de saneamento e meio ambiente, porém não têm uma boa comunicação e integração de esforços, o que é extremamente danoso para políticas públicas de médio e longo prazo.

Esse anacronismo pode ser acompanhado na transposição do Rio São Francisco, em que se observa a falta de sintonia federativa entre União e estados receptores da água, a tal ponto que não se tem segurança sobre como será a governança da água. Esse fato demonstra de

certo modo a pouca capacidade de articulação entre os entes, que se guiam mais pela política partidária do que pela boa técnica e planejamento prévio, deixando visível a fragilidade da gestão hídrica nos estados. Ora, essa é uma obra que foi executada por mais de 10 anos e não se tinha ainda o modelo de governança e gestão das águas.

Na transposição, a União desenhou a política; os estados, como, geralmente, possuem suas companhias de água e esgoto, delineiam suas políticas; e o município é o titular do saneamento básico e, quase sempre, o elo mais frágil, principalmente quando se pensa num modelo de federação que tem 80% dos municípios com menos de 50 mil habitantes, em que grande parte depende do Fundo de Participação para poderem equilibrar seu orçamento e que quase não gera receita própria.

Isso é uma tragédia anunciada que pode ser verificada na qualidade do saneamento básico no País. O Semiárido é apenas uma parcela do problema, que, certamente não será resolvido com a transposição, que apenas fornecerá água através de sistemas de abastecimento antigos e obsoletos para muitos municípios que não têm sequer sistema de saneamento (Medeiros

et al., 2014). Mesmo com o Novo Marco do Saneamento Básico aprovado em julho de 2020, o Projeto de Lei nº 4.162, de 2019⁷, pensa-se que a solução não será das melhores para a maior parte dos municípios brasileiros, que são pequenos e pouco atrativos para a iniciativa privada, assim como o campo. Na Figura 4, vê-se a situação de saneamento no Brasil depois de 10 anos de PNSB, 20 anos de PNRH, 36 de PNMA e quase 30 anos de Constituição Cidadã.

Pela Figura 4, percebe-se o resultado de anos de descaso com essa dimensão essencial para todas as regiões do País. Trata-se da eficiência da remoção de demanda bioquímica por

oxigênio (DBO), o que significa que quanto maior a quantidade de resíduos, maior é a demanda por oxigênio e isso dificultará, ou inviabilizará, a vida de organismos no esgoto coletado e nos mananciais onde ele é lançado.

Quanto mais eficiente for o tratamento, melhor a disponibilidade de oxigênio para a vida de organismos que, em geral, que vivem em rios e mares. É comum tomar-se conhecimento de grande quantidade de plásticos nos oceanos, que chegam a matar peixes, tartarugas e outras formas de vida marinha. Tudo isso ocorre, principalmente, por falta de tratamento adequado desses efluentes, que se deve, principalmente,

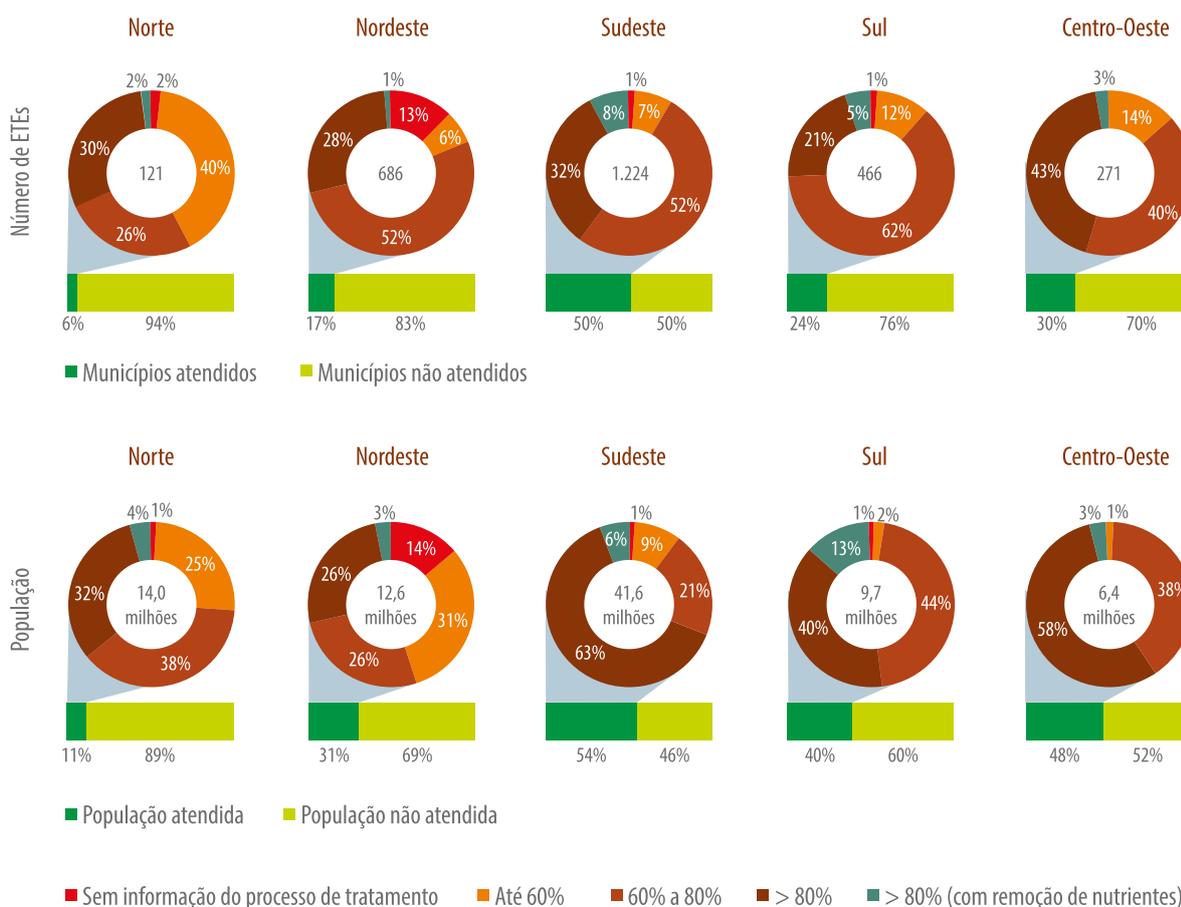


Figura 4. Situação brasileira da eficiência do serviço de tratamento de esgoto por região.

ETE: estação de tratamento de esgoto.

Fonte: Agência Nacional de águas (2017).

⁷ Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2213200>.

ao insuficiente investimento em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Na Figura 5, demonstra-se o quanto ainda é visível a dificuldade de se coletar esgoto no Brasil e na região semiárida.

A situação não é alvissareira para o Semiárido, principalmente quanto ao cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), especificamente a meta 6, referente à universalização da água potável e esgoto tratado até 2030. Porém, é preciso visualizar o Brasil a partir de outra escala, a de bacia hidrográfica que apresenta uma outra complexidade. Na Figura 6, apresenta-se a remoção de resíduos

baseado na divisão de bacias hidrográficas, uma vez que muitas delas são utilizadas para diluição de esgoto não tratado. Apesar de ser um método arcaico, é previsto em lei, e deve ser acompanhado pelos órgãos estatais e autorizado previamente pelos órgãos ambientais.

Diante desses dados e da certeza que a irregularidade de chuvas vai aumentar, é preciso tomar medidas que preservem nascentes, que tornem o solo mais permeável, que preservem as florestas, e que permitam reaproveitar a água. Diante da certeza que ações como a transposição e outras similares são insuficientes, necessita-se de outras ações interligadas que possam tornar o fornecimento de água mais eficiente e o trata-

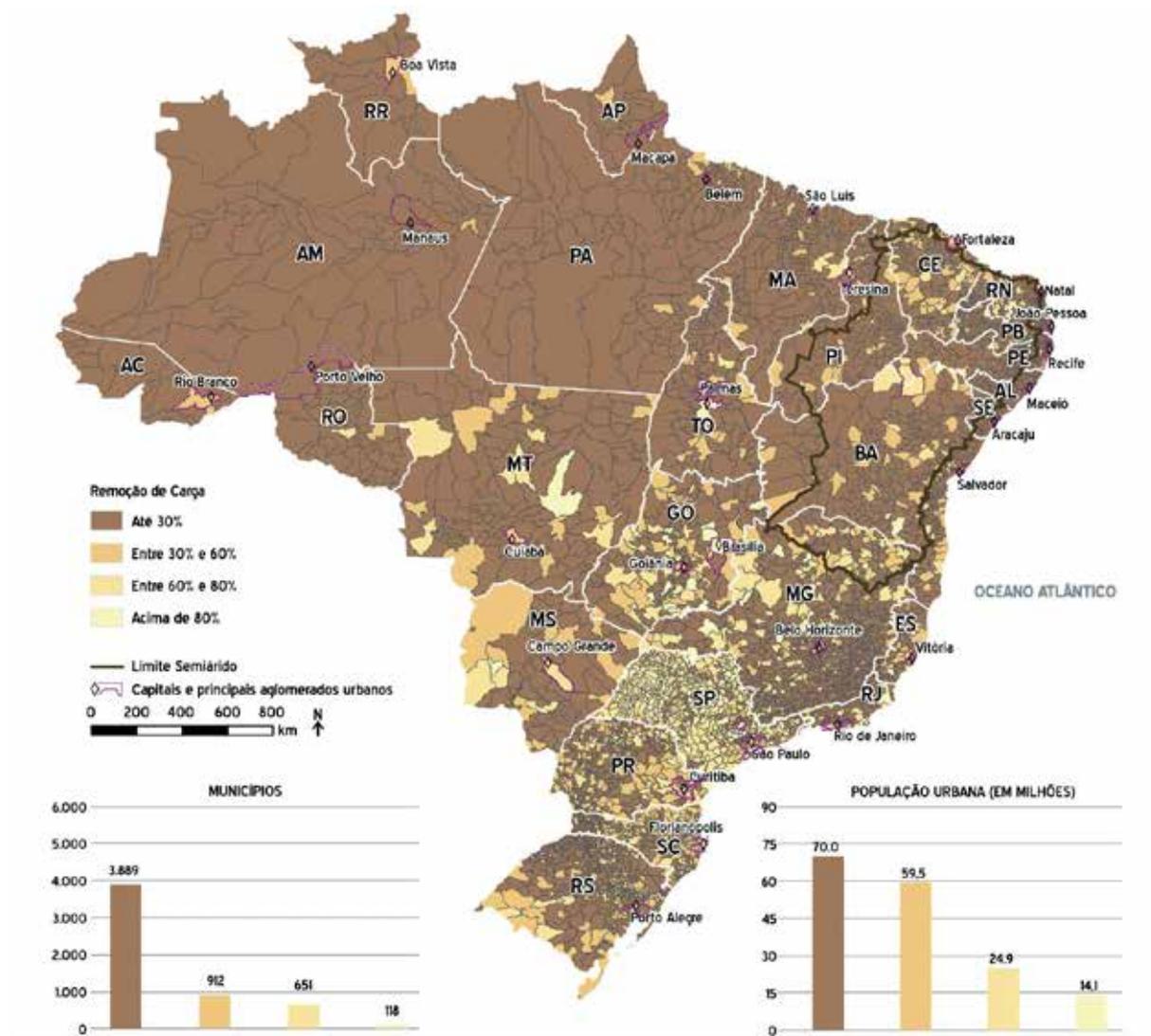


Figura 5. Remoção de carga de esgotos urbanos.

Fonte: Agência Nacional de Águas (2017).

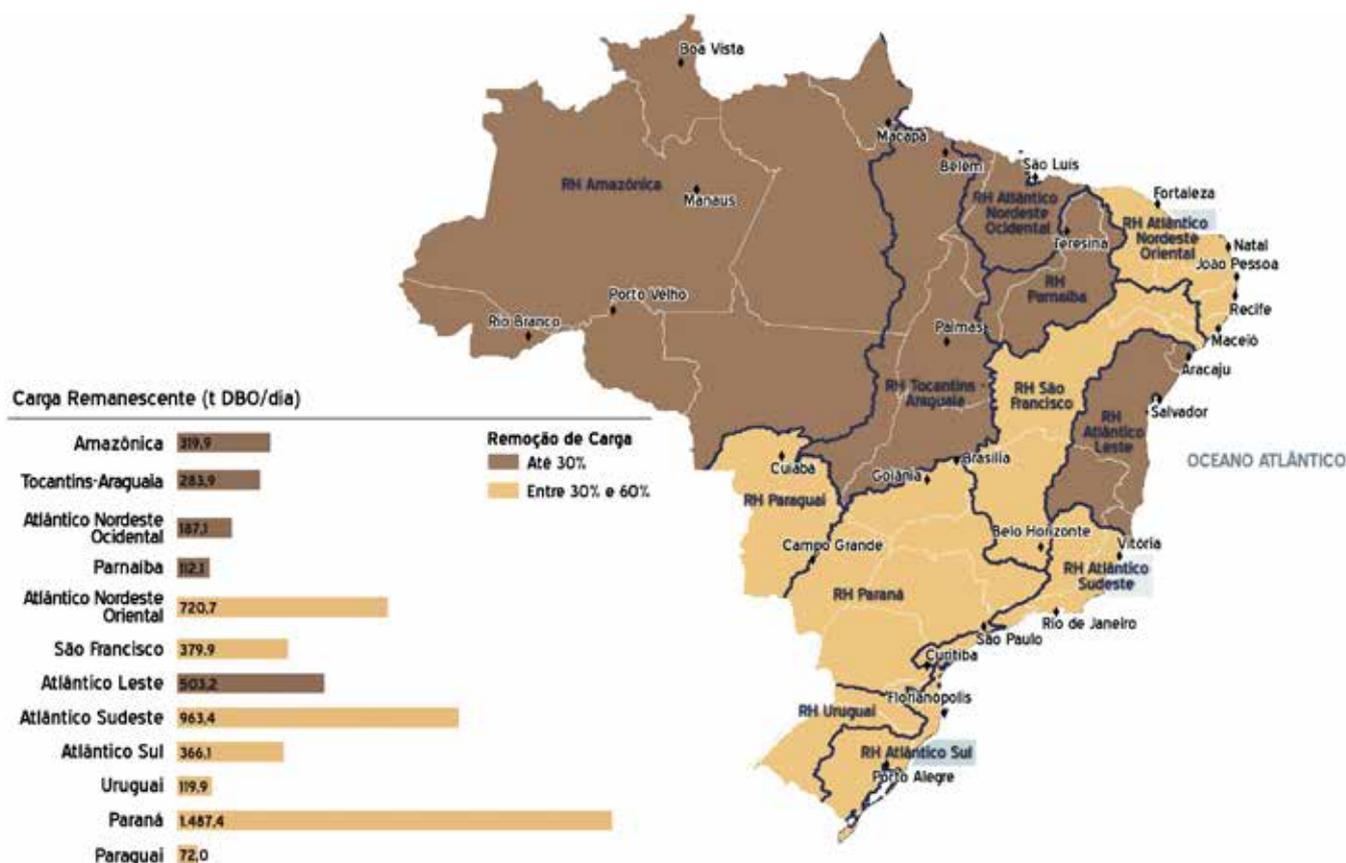


Figura 6. Remoção de carga de esgoto por região hidrográfica.

Fonte: Agência Nacional de Águas (2017).

mento de esgotos factível. Isso sim poderá ser uma alternativa para uma resiliência ambiental no Semiárido mais efetiva. Não se tem uma posição confortável diante da quantidade de água superficial e subterrânea, como os aquíferos, pois, como se mencionou no início dessa seção, é preciso quantidade e qualidade para se ter um balanço hídrico mínimo para fornecimento de água de boa qualidade à população.

Considerações finais

O grande equívoco talvez esteja em relacionar uma crise ambiental apenas a um espaço territorial específico. É preciso pensar nas mudanças climáticas, sua influência no ciclo hidrológico, na falta de planejamento a partir de bacias hidrográficas partindo erroneamente da divisão político-administrativa federativa que não leva

em conta a própria continuidade territorial dos ecossistemas, dos rios e florestas. É urgente remodelar a forma de pensar, a maneira de pesquisar e resgatar o discurso de uma transdisciplinaridade sistêmica.

No campo dos recursos hídricos, essa questão ainda é pior, uma vez que essa temática não poderia estar na ordem do dia apenas quando da escassez de chuvas, sendo necessária uma mudança de perspectiva saindo de medidas imediatas para medidas mediatas, a médio e longo prazos, que não podem partir apenas dos usuários, mas de todos os setores que utilizam esse recurso de alguma forma, considerando os múltiplos usos da água. Em relação a isso, pensa-se que a campanha publicitária, ou outras mais interventivas, não podem se deter aos usuários domésticos, mas à cadeia produtiva por exemplo, aos agricultores que são os que

mais demandam água em conjunto com o setor industrial, mais de 80% do total.

Há gestores e políticos que afirmam que o sertão vai se transformar num mar de prosperidade, que a agricultura vai dar uma guinada com a transposição. Entretanto, não se observam esses atores convocando a população para realizar o pagamento e planejamento integrado acerca do uso da água para a produção agrícola, para a dessedentação animal e as necessidades das cidades. Incluem-se também as questões relacionadas ao uso de agrotóxicos que contaminam os alimentos, o solo, as nascentes e o lençol freático. A chave do planejamento do setor para o Semiárido e para qualquer outra região do planeta está na integração do campo, cidades e biomas, gerenciando-se esse valioso recurso de forma integrada, sistêmica, de modo a percebê-lo necessário para todos.

É preciso criar instrumentos econômicos que levem em conta os serviços ambientais prestados pelos ecossistemas, seja em propriedade pública ou em propriedade privada, bem como inserir o Semiárido como ecossistema constitucionalmente reconhecido, reparando um equívoco do constituinte de 1988.

Portanto, o Semiárido cada vez mais vai sofrendo os resultados da mudança do clima, sendo necessária uma mudança de paradigma nas políticas públicas para a região, formulando-as a partir dessa nova realidade, pensando em formas de otimizar o uso e acesso à água e disseminando tecnologias de reúso de água, seja em sistemas individualizados ou em sistemas coletivos. Além disso, recuperar a vegetação e o solo de modo a preservar os rios, as nascentes e as águas subterrâneas, tornando-se cada vez mais imprescindível a disposição correta dos resíduos, problemas ainda crônico no país.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas esgotos:** despoluição de bacias hidrográficas. Brasília, DF, 2017.

ARAÚJO, M. do S. B. de; MORAIS, Y. C. B.; MOURA, M. S. B. de; GALVÍNIO, J. D.; MIRANDA, R. de Q. Análise

do sequestro de carbono em áreas de caatinga do Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 585-599, out./dez. 2017. DOI: [10.1590/0102-7786324007](https://doi.org/10.1590/0102-7786324007).

AZEVEDO, R. E. S. de; OLIVEIRA, V. P. V. de. Reflexos do novo Código Florestal nas Áreas de Preservação Permanente – APPs – urbanas. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 29, p. 71-91, abr. 2014. DOI: [10.5380/dma.v29i0.32381](https://doi.org/10.5380/dma.v29i0.32381).

BARBEIRO, L. da S. S.; KLUPPEL, M. L. W.; SANQUETTA, C. R.; VIEIRA, G. Teores de carbono em espécies vegetais da caatinga e do cerrado. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 7, n. 2, p. 145-155, abr./jun. 2009. DOI: [10.7213/cienciaanimal.v7i2.9846](https://doi.org/10.7213/cienciaanimal.v7i2.9846).

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Plano Estratégico de Desenvolvimento Sustentável do Semi-árido**. Brasília, DF, 2005. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNPU/Biblioteca/publicacoes/PDSA-Arrumado.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Convenção sobre diversidade biológica**. Brasília, DF, 2002. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/textoconvenoportugus.pdf>. Acesso em: 4 de ago. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Pagamentos por Serviços Ambientais na Mata Atlântica:** lições aprendidas e desafios. Brasília, DF, 2011. Disponível em: https://florestasdefuturo.files.wordpress.com/2013/06/pagamentos_por_servicos_ambientais_na_mata_atlantica.pdf. Acesso em: 4 de ago. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Programa Nacional de Capacitação de gestores ambientais:** licenciamento ambiental. Brasília, DF, 2009.

BURSZTYN, M. A.; JARDIM, M. H. Pagamento por serviços ambientais na gestão de recursos hídricos: o caso de Extrema (MG). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20 n. 3, jul./set. 353-360, 2015. DOI: [10.1590/S1413-4152201502000106299](https://doi.org/10.1590/S1413-4152201502000106299).

BURSZTYN, M.; BURSZTYN, M. A. **Fundamentos de política e gestão ambiental:** os caminhos do desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: Garamond, 2012.

CAPRA, F. **O ponto de mutação:** a ciência, a sociedade e a cultura emergente. 27. ed. São Paulo: Cultrix, 2006.

CHACON, S. S.; BURSZTYN, M. Análise das políticas públicas para o sertão semi-árido: promoção do desenvolvimento sustentável ou fortalecimento da pobreza? In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA, 6., 2005, Brasília, DF. **Anais [...]** Brasília, DF: ECO-ECO, 2005.

COELHO, F. M. G.; DUQUE-BRASIL, R.; SOLDATI, G. T.; COSTA, F. V. da; MARCATTI, A. A.; REIS-JR, R. Riqueza de plantas e estrutura de quintais familiares no semi-árido

- norte mineiro. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, supl. 2, p. 864-866, jul. 2007.
- COSTA, T. L. da; SAMPAIO, E. V. de S. B. Estoques e fluxos de carbono no semi-árido nordestino: estimativas preliminares. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, p. 1275-1291, 2011.
- CREPALDI, M. A.; BUENO, R. K.; BOLZE, S. D. A.; GOMES, L. B. As origens do pensamento sistêmico: das partes para o todo. **Pensando Famílias**, v. 18, n. 2, p. 3-16, dez. 2014.
- DARDOT, P.; LAVAL, C. **A nova razão do mundo**: ensaios sobre a sociedade neoliberal. São Paulo: Boitempo, 2016.
- GARCIA, J. R.; PARRON, L. M.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 372 p.
- LEFF, E. **Saber ambiental**: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder. Petrópolis: Vozes, 2001.
- LEFF, H. **Epistemologia ambiental**. 3. ed. São Paulo: Cortez, 2002.
- LEFF, H. **Racionalidade ambiental**: a reapropriação social da natureza. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2006.
- LINDOSO, D. **Vulnerabilidade e adaptação da vida às secas**: desafios à sustentabilidade rural familiar nos semiáridos nordestinos. 2013. 519 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília, Brasília DF.
- MEDEIROS, S. S. de; SALCEDO, I. H.; SANTOS, D. B. dos; BATISTA, R. de O.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; LIMA, R. C. C.; MARTÍN PEREZ, A. M. **Esgotamento sanitário**: panorama para o semiárido brasileiro. Campina Grande: Insa, 2014.
- NASCIMENTO, E. P. do. Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, 2012. DOI: [10.1590/S0103-40142012000100005](https://doi.org/10.1590/S0103-40142012000100005).
- PORTO-GONÇALVES, C. W. **A globalização da natureza e a natureza da globalização**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2006.
- ROCHA, J. D.; BURSZTYN, M. Políticas públicas territoriais e sustentabilidade no semi-árido brasileiro: a busca do desenvolvimento via Arranjos Produtivos Locais. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA, 7., 2008, Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza, 2007.
- RODELL, M.; FAMIGLIETTI, J. S.; WIESE, D. N.; REAGER, J. T.; BEAUDOING, H. K.; LANDERER, F. W.; LO, M. H. Emerging trends in global freshwater availability. **Nature** v. 557, p. 651-659, May 2018. DOI: [10.1038/s41586-018-0123-1](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1).
- SEZGIN, Z. Ecological modernization: a viable option for a sustainable future? **Marmara Journal of European Studies**, v. 20, n. 1, p. 219-245, 2012.
- SILVA, J. I. A. O. **Ressignificação Ambiental e modernização ecológica no Semiárido**: o projeto de integração e revitalização do São Francisco. São Paulo: Hucitec, 2016.
- SILVA, J. I. A. O. **Segurança hídrica ecológica**: fundamentos para um conceito jurídico. 2020. 410 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba.
- SILVA, R. M. A. da. Entre dois paradigmas: combate à seca e convivência com o semi-árido. **Sociedade e Estado**, v. 18, n. 1/2, p. 361-385, jan./dez. 2003. DOI: [10.1590/S0102-69922003000100017](https://doi.org/10.1590/S0102-69922003000100017).
- SILVA, R. M. A. da. Entre o combate à seca e a convivência com o semi-árido: políticas públicas e transição paradigmática. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 38, n. 3, jul./set. 2007.

Solos do Semiárido

Características e estoque de carbono

José Coelho de Araújo Filho

Flávio Adriano Marques

André Julio do Amaral

Tony Jarbas Ferreira Cunha (in memoriam)

Valdomiro Severino de Souza Júnior

Pauliana Valéria Machado Galvão

Introdução

A região semiárida brasileira localiza-se na porção central da região Nordeste do Brasil e recobre uma parte do norte do estado de Minas Gerais. Recentemente sua área foi ampliada de 982.563 km² (Silva et al., 2010) para 1.128.697 km² (Brasil, 2017), o que equivale a 13,2% do território nacional.

Em reflexo às condições climáticas, as formações vegetais dominantes no Semiárido são caducifólias e pertencem ao bioma Caatinga, conforme discutido em Araújo Filho et al. (2017). Entretanto, cabe destacar que ocorrem algumas áreas de exceção com vegetação florestal mais úmida e, também áreas com Cerrado, ou uma mistura dessas formações vegetais, ou ainda ambientes de transição do tipo Caatinga/floresta ou Caatinga/Cerrado. Outra particularidade do ambiente semiárido é a diversidade de material geológico, seja de rochas cristalinas, sedimentares seja de sedimentos que, em consequência, propiciam a formação de diversos tipos de solos, desde rasos até profundos, de arenosos até argilosos, de cauliniticos a esmectíticos. Também é importante realçar a ação climática atenuada sobre o material geológico devido à escassez de umidade. Isso faculta uma intemperização química mais lenta das rochas e sedimentos em relação às zonas quentes e úmidas, o que resulta por vezes na presença mar-

cante de frações grossas (cascalhos e calhaus) nos solos (Araújo Filho et al., 2014, 2017).

O ambiente semiárido, em função das variações na cobertura vegetal, geológica e pedológica, tem uma grande variedade de geoambientes (Silva et al., 1993), com potencialidades distintas para a produção de biomassa vegetal e, conseqüentemente, para o sequestro de dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e acúmulo de carbono nos solos.

O carbono (C) do solo encontra-se na forma inorgânica e orgânica (Nelson; Sommers, 1996). Na forma inorgânica, está associado às rochas e sedimentos essencialmente carbonáticos. Na forma orgânica, constitui parte da matéria orgânica dos solos, a qual corresponde aos resíduos vegetais e animais encontrados em diferentes estágios de decomposição. Integra desde a biomassa recém-depositada ao solo até aqueles compostos com elevado grau de transformação física, química e biológica, de constituição e comportamento bastante distintos em relação ao material original (Nelson; Sommers, 1996). Na maioria dos ecossistemas terrestres, inclusive no bioma Caatinga, o carbono orgânico (CO) ocorre em maior quantidade e possui um menor período de residência (maior dinâmica de transformação) em relação ao inorgânico, e por isso será o foco deste trabalho.

O CO representa cerca de 50% da matéria orgânica do solo (Pribyl, 2010), a qual contribui com

várias funções, como a formação e estabilização de agregados (peds), a retenção de água e a reserva e disponibilização de nutrientes para os vegetais e microrganismos (Silva; Mendonça, 2007; Braida et al., 2011). Adicionalmente, a composição química e o conteúdo de CO no solo são utilizados como parâmetro para se inferir sobre a qualidade desse solo e avaliar práticas de manejo e conservação das terras, além da sustentabilidade de sistemas de produção agrícola (Vezzani; Mielniczuk, 2009).

Em razão das mudanças climáticas, que têm como um de seus componentes as interferências antrópicas sobre os reservatórios naturais de carbono, particularmente dos compartimentos terrestres, os estudos sobre os teores, estoques e a dinâmica de CO nos solos no contexto regional, nacional e mundial têm ganhado destaque (Bernoux et al., 2002; Fidalgo et al., 2012). O solo é um importante reservatório de carbono (3.500 Pg a 4.000 Pg de C) (1 Pg = 1 petagrama = 1 bilhão de toneladas), acumulando mais desse elemento que os compartimentos atmosfera (829 Pg de C) e vegetação (420 Pg a 620 Pg de C) (Lehmann; Kleber, 2015).

Geralmente, quando ocorre a substituição da cobertura vegetal primária de um bioma por outros usos, há diminuição dos teores naturais de CO do solo e, conseqüentemente, do seu estoque. O uso histórico dos solos do Semiárido, com o desmatamento e o emprego regular das queimadas para posterior cultivo, tende a diminuir os estoques de CO (Salcedo; Sampaio, 2008; Fracetto et al., 2012). É importante destacar que a recuperação dos conteúdos originais de carbono orgânico nos solos (COS) da Caatinga é, comumente, um processo lento, estabelecido na escala de décadas (Araújo Filho et al., 2018).

O objetivo deste capítulo é apresentar uma estimativa global do estoque de COS da região semiárida brasileira, considerando os diversos tipos de solos e seus domínios nessa região. Ressalta-se que estimativas dessa magnitude são difíceis de se obter, por vários motivos: a) conhecimento limitado sobre a extensão dos solos (estados mapeados com escalas diferentes e generalizadas); b) escassez de da-

dos precisos sobre os solos (densidade do solo, profundidade efetiva; frações grossas); c) variação espacial e em profundidade dos valores de COS, densidade e frações grossas em solos de mesma classe; e d) elevada dinâmica do uso e cobertura das terras. A seguir descrevem-se, resumidamente, os principais solos e depois é apresentada a estimativa global do estoque de COS do Semiárido.

Características gerais dos solos

Em razão das elevadas taxas de evapotranspiração potencial e das baixas precipitações pluviárias, as perdas de cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+) na cobertura pedológica no Semiárido são reduzidas. Por isso, a maioria dos solos possui o caráter eutrófico, isto é, alta saturação por bases ($V\% \geq 50\%$), exceto aqueles desenvolvidos a partir de material geológico muito pobre como, por exemplo, rochas areníticas. Além dessa particularidade geral dos solos, outros aspectos mais específicos de natureza química, física, morfológica e mineralógica podem ser destacados, conforme a seguir.

Características químicas

Os dados analíticos de perfis de solos representativos vinculados aos levantamentos exploratório-reconhecimento de solos no contexto do Semiárido permitem uma visão sinótica da natureza química dos solos da região. Um dos parâmetros químicos que reflete adequadamente essa visão é a soma de bases trocáveis ($\text{SB} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+$), uma vez que possui grande sensibilidade às variações ambientais, sobretudo de ordem climática e geológica. Além disso, correlaciona-se estreitamente com a fertilidade natural dos solos.

Apesar de a lixiviação de bases da cobertura pedológica ser pouco expressiva, os valores da SB vigentes nos solos são muito variados (Figura 1). Isso acontece, sobretudo, devido à

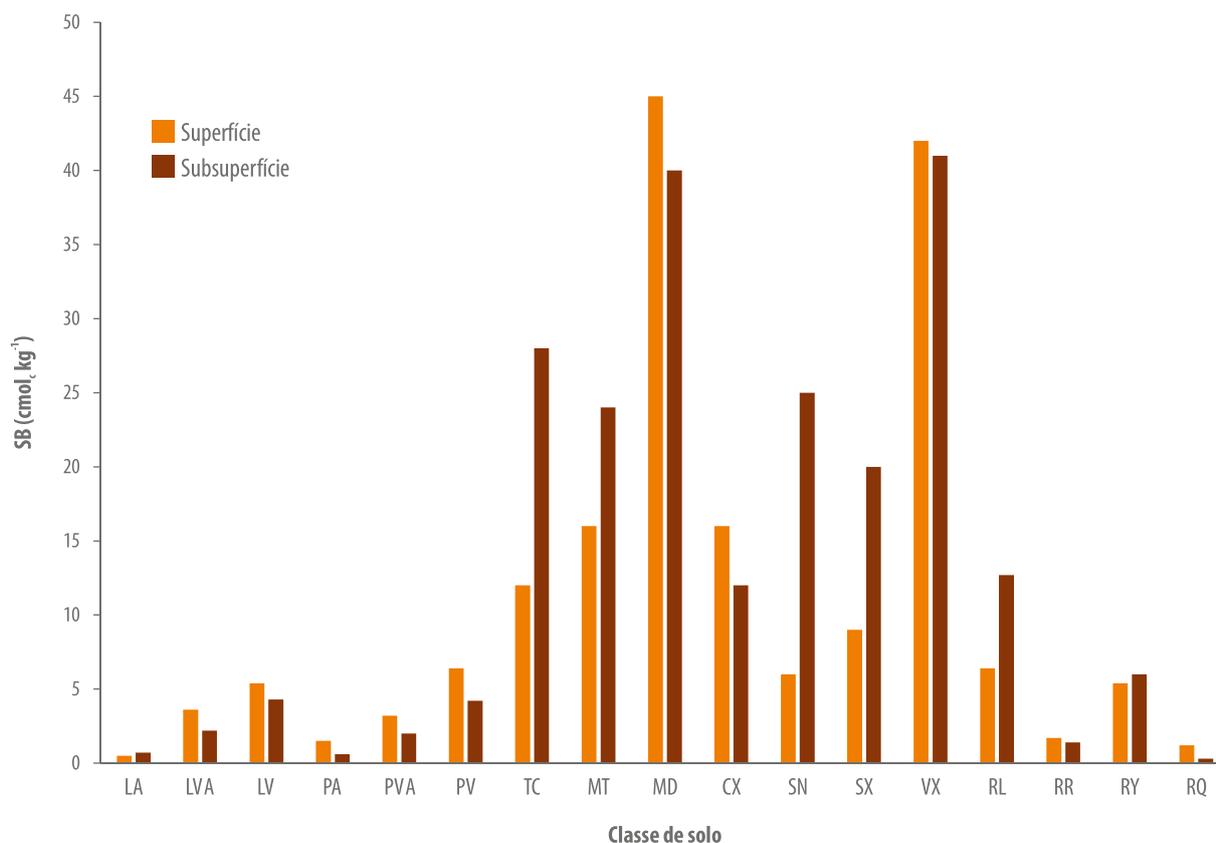


Figura 1. Soma de bases (SB) de perfis representativos por classe de solo no Semiárido brasileiro.

LA: Latossolo Amarelo; LVA: Latossolo Vermelho-Amarelo; LV: Latossolo Vermelho; PA: Argissolo Amarelo; PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; PV: Argissolo Vermelho; TC: Luvisso Crômico; MT: Chernossolo Argilúvico; MD: Chernossolo Rêndzico; CX: Cambissolo Háplico; SN: Planossolo Nátrico; SX: Planossolo Háplico; VX: Vertissolo Háplico; RL: Neossolo Litólico; RR: Neossolo Regolítico; RY: Neossolo Flúvico; RQ: Neossolo Quartzarênico.

O termo “superfície” refere-se ao horizonte A, numa camada de 0 a 20 cm; e o termo “subsuperfície” refere-se ao horizonte B ou C, numa camada entre 20 cm e 150 cm.

Fonte: Adaptado de Jacomine et al. (1975a, 1975b, 1976, 1977) e Jacomine, (1986).

natureza do material de origem dos solos (fator geológico), uma vez que as variações de ordem climática são relativamente pequenas. Nos ambientes onde as rochas são mais ricas em minerais máficos (rochas básicas), a SB é relativamente alta ($> 6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), como se verifica nos Luvissoles (TC), Chernossolos (MT, MD), Vertissolos (V) e em grande parte dos Cambissolos desenvolvidos de rochas calcárias. Por outro lado, quando o material de origem é ácido (rochas ricas em minerais félsicos), a SB em geral assume valores baixos ($< 3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). São exemplos dessa situação solos desenvolvidos a partir de rochas graníticas, como é o caso dos Neossolos Regolíticos (RR), bem como de solos arenosos formados a partir de rochas areníti-

cas ou a partir de sedimentos essencialmente quartzosos, como é o caso dos Neossolos Quartzarênicos (RQ) e de alguns Latossolos (LA, LVA, LV) (Figura 1). Valores intermediários da SB (de $3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ a $6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) vão se correlacionar com material de origem (rochas ou sedimentos) diversificados, refletindo, em geral, uma situação intermediária entre rochas ácidas e básicas.

No Semiárido, em geral, os solos são moderadamente ácidos a moderadamente alcalinos (pH em água entre 5,3 e 8,3). Porém, em situações localizadas, tanto em função do material de origem como da drenagem local, os solos podem apresentar reação fortemente ácida (pH $< 5,3$) ou até mesmo fortemente alcalina (pH $> 8,3$).

Nesse último caso, essas condições são verificadas, notadamente, onde há acúmulo de sais de carbonatos e/ou alta saturação por cátions básicos de cálcio e magnésio. Isso é mais frequente em áreas com presença de rochas calcárias e/ou sedimentos carbonáticos ou ainda em ambientes de várzeas, onde ocorrem solos afetados por sais.

Características físicas

Além das frações argila ($< 0,002$ mm), silte ($0,05$ mm – $0,002$ mm) e areia (2 mm – $0,05$ mm), as frações cascalho (2 mm – 20 mm) e calhaus (20 mm – 200 mm) ocupam volume expressivo nos solos desenvolvidos no Semiárido. Essas frações mais grossas implicam em redução na capacidade de armazenamento de água e de CO₂, e no aumento da densidade do solo. Os cascalhos são bastante comuns nos perfis da maioria dos solos, sobretudo naqueles menos desenvolvidos. Já calhaus e, mesmo, matacões (20 cm – 100 cm), normalmente tipificam a pedregosidade (pavimento desértico) distribuída com maior frequência nos horizontes superficiais dos solos desenvolvidos a partir de rochas cristalinas e com menor frequência naqueles formados a partir de sedimentos. Registra-se, ainda, que materiais ferruginosos concrecionários, embora não sejam comuns na maioria das regiões semiáridas do globo terrestre (Skujins, 1991; Nahon; Tardy, 1992), têm sido constatados, frequentemente, no contexto do Semiárido brasileiro, principalmente nas áreas com cobertura pedimentar sobre rochas cristalinas (Araújo Filho et al., 2000) e nas bordas ou encostas de chapadas (Jacomine, 1986).

Características morfológicas

Do ponto de vista morfológico, uma das características mais marcantes na cobertura pedológica do Semiárido é a pequena profundidade efetiva dos solos, sobretudo daqueles desenvolvidos a partir de rochas cristalinas. Com exceção dos solos formados a partir de sedimentos, a

maioria situa-se entre rasos (≤ 50 cm) e pouco profundos (> 50 cm e ≤ 100 cm) (Figura 2).

Cabe destacar que, na superfície dos solos, em geral, o horizonte mineral é do tipo A fraco ou moderado, conforme conceituados no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Santos et al., 2018). Entretanto, em áreas mais localizadas e elevadas, como nos brejos de altitude, verificam-se os tipos A proeminente ou A húmico (Santos et al., 2018), isto é, com substancial conteúdo de COS se comparados aos primeiros. Já no contexto de solos formados a partir de rochas calcárias, ou mesmo de algumas ricas em minerais máficos, destacam-se alguns solos com horizonte A do tipo chernozêmico (Santos et al., 2018), isto é, com elevada saturação por bases e, normalmente, com alto conteúdo de matéria orgânica. Mais detalhes sobre os diferentes tipos de horizontes superficiais são descritos em Santos et al. (2018).

Características mineralógicas

Os argilominerais componentes dos solos são uma consequência da ação do intemperismo sobre os diversos materiais de origem (rochas ou sedimentos) e dependem fundamentalmente do regime hídrico dos solos e da interação solo-material de origem-água.

No Semiárido, os valores da evapotranspiração potencial podem atingir mais que o dobro daqueles das precipitações pluviais, condicionando a manutenção de bases e sais no solo. Nesse contexto, as perdas parciais de bases e de sílica e a reação do solo, predominantemente na faixa de moderadamente ácida a moderadamente alcalina (pH 5,3–8,3), permitem a formação tanto de argilominerais 1:1 (grupo da caulinita) como também de argilominerais 2:1 (grupo das esmectitas), esses últimos encontrados especialmente nos locais com maior concentração de bases (Tardy et al., 1973; Bonneau; Souchier, 1994). Tem-se constatado também que, mesmo nos solos com os mais altos teores de bases, a exemplo dos Vertissolos, os argilominerais 1:1 (grupo da caulinita) ocorrem associados aos



Foto TC: Flavio Adriano Marques. Foto SN: Mateus Rosas Ribeiro (in memoriam). Demais fotos: José Coelho de Araújo Filho

Figura 2. Perfis de solo representativos do Semiárido brasileiro.

LA: Latossolo Amarelo; LVA: Latossolo Vermelho-Amarelo; LV: Latossolo Vermelho; PA: Argissolo Amarelo; PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; PV: Argissolo Vermelho; TC: Luvisso Crômico; MT: Chernossolo Argilúvico; CX: Cambissolo Háplico; SN: Planossolo Nátrico; SX: Planossolo Háplico; VX: Vertissolo Háplico; RL: Neossolo Litólico; RR: Neossolo Regolítico; RY: Neossolo Flúvico; RQ: Neossolo Quartzarênico.

2:1 do grupo das esmectitas. Isso é comum em solos desenvolvidos a partir de rochas calcárias assim como a partir de rochas ricas em minerais máficos (Lyra, 1993; Ahmad; Mermut, 1996; Embrapa, 1998; Corrêa et al., 2003; Ferreira; Ferreira, 2009) e ainda em solos com presença de horizontes vérticos, como é o caso de certos Luvisolos, Cambissolos e Chernossolos.

Características gerais das classes de solo

A distribuição dos solos com maior expressão geográfica no Semiárido brasileiro está apresentada na Figura 3. Em seguida são descritas as principais características desses solos, sequenciados em ordem alfabética.

Argissolos – São solos minerais, não hidromórficos, com horizonte subsuperficial B textural, tipicamente de acúmulo de argila, predominantemente com argila de atividade baixa. Nos casos em que apresentam argila com atividade alta, estes são distróficos (Santos et al., 2018). Desenvolvem-se a partir dos mais diversos materiais de origem e abrangem características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas diversificadas. Entretanto, são menos heterogêneos do ponto de vista mineralógico em função do seu grau relativamente maior de evolução pedogenética em relação a outros solos do Semiárido. De modo geral, mostram predomínio de argilominerais do grupo das caulinitas e uma menor proporção de micas (Embrapa, 1998). São solos predominantemente profundos, mas variam desde rasos a muito profundos e apresentam cores amareladas, avermelhadas e, por vezes, acinzentadas. Na superfície, a textura varia normalmente na faixa de arenosa a média e, em subsuperfície, de média a argilosa. No domínio da Caatinga, ocupam cerca de 15% da área (Jacomine, 1996), o que é um valor aproximado para toda região semiárida.

Cambissolos – Compreendem solos minerais, não hidromórficos, pouco desenvolvidos do ponto de vista pedogenético, mas que apresen-

tam horizonte B incipiente (Bi) e pequena ou nula variação textural ao longo do perfil (Santos et al., 2018). No Semiárido, uma das características marcantes desses solos é a presença de minerais primários de fácil alteração na fração cascalho do horizonte Bi, comumente com textura média a argilosa. Por serem desenvolvidos a partir de uma grande variedade de material de origem, suas características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas são muito diversificadas. Os desenvolvidos de calcários são os mais expressivos no Semiárido e, em geral, possuem alto conteúdo de bases trocáveis (Figura 1) e comumente contêm carbonatos. Alguns Cambissolos, porém, apresentam semelhanças morfológicas com Latossolos, mas diferenciam-se destes por apresentar $CTC \geq 17 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila, 4% ou mais de minerais primários facilmente alteráveis, espessura do horizonte Bi inferior a 50 cm, relação Ki superior a 2,2 e, ou, teores relativamente mais elevados de silte em profundidade. Em termos de expressividade no domínio da Caatinga, ocupam cerca de 4% da área (Jacomine, 1996), sendo também um valor aproximado para o contexto de toda região semiárida.

Chernossolos – São solos minerais, não hidromórficos, eutróficos, ricos em Ca^{2+} e Mg^{2+} , e se caracterizam por apresentar um horizonte superficial escuro e fértil (A chernozêmico) sobre um horizonte B textural ou B incipiente com argila de atividade alta, ou ainda, sobre materiais ricos em carbonatos (Santos et al., 2018). Em geral, são solos pouco profundos com textura média a argilosa em superfície e argilosa a muito argilosa em subsuperfície. O material de origem desses solos, onde são mais expressivos, relaciona-se com rochas calcárias ou sedimentos ricos em carbonatos. São solos de pequena expressão geográfica ocupando, no máximo, 0,5% da área do Semiárido.

Latossolos – São solos minerais, pedogeneticamente muito desenvolvidos, com a presença de um horizonte B latossólico (Bw) imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial. No Semiárido apresentam normalmente textura média a argilosa no horizonte Bw. Inde-

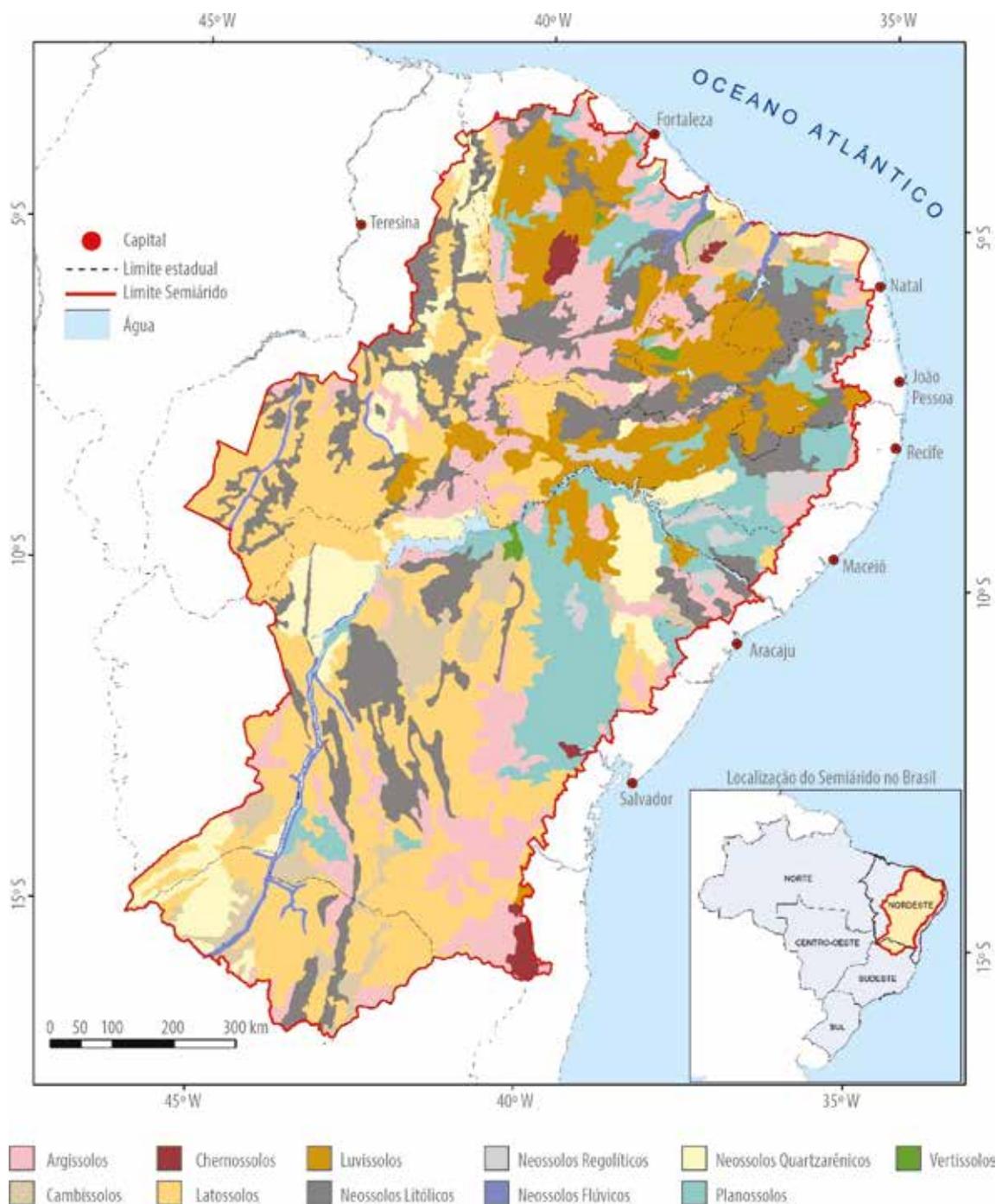


Figura 3. Mapa dos grandes domínios de solo do Semiárido brasileiro.

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2011).

pendente do material de origem do qual foram desenvolvidos, possuem um conjunto de propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas relativamente uniformes ao longo do perfil, refletindo o avançado estágio de intemperismo-lixiviação a que foram submetidos. Em função disso, restam no perfil de alteração

argilominerais 1:1, óxidos de ferro (Fe), alumínio (Al) e titânio (Ti), quartzo, e alguns poucos minerais resistentes ao intemperismo, podendo ainda conter, em determinadas situações, uma quantidade muito pequena de minerais primários facilmente alteráveis (Santos et al., 2018). Apesar da uniformidade de propriedades, o

longo do perfil do solo, entre perfis desenvolvidos a partir de diferentes materiais de origem, pode apresentar diferenças entre si, permitindo enquadrá-los em várias classes em níveis categóricos inferiores à ordem. Apresentam cores amarelas, vermelho-amarelas, vermelhas e, por vezes, acinzentadas, com teores de óxidos de Fe muito diversificados. No domínio da Caatinga, ocupam uma área em torno de 21% (Jacomine, 1996), sendo também um valor aproximado para o contexto de toda região semiárida.

Luvisolos – São solos minerais eutróficos, não hidromórficos, pouco profundos a rasos, com horizonte B textural apresentando argila de atividade alta (Santos et al., 2018) e normalmente com teores elevados de cátions básicos. Geralmente ocorrem associados com pedregosidade na parte superficial do perfil de solo, especialmente no contexto da Depressão Sertaneja. Podem apresentar horizonte vértico e, comumente, o caráter solódico e, ou, salino (Jacomine et al., 1989; Luz et al., 1992; Embrapa, 1998; Corrêa et al., 2003; Fernandes et al., 2010). As cores do horizonte Bt comumente são avermelhadas. No domínio da Caatinga, ocupam cerca de 13% da área (Jacomine, 1996), sendo também um valor aproximado para o contexto de toda a região semiárida.

Neossolos – São solos pouco desenvolvidos com sequência de horizontes do tipo A, C ou A, R e guardam características mineralógicas relativamente próximas às do material de origem (Santos et al., 2018). Apresentam grande expressão geográfica, com cerca de 35% da área no domínio da Caatinga (Jacomine, 1996), o que é um valor aproximado para o contexto de toda a região semiárida. Conforme o SiBCS (Santos et al., 2018), os Neossolos são subdivididos em quatro subordens: Neossolos Litólicos, Neossolos Flúvicos, Neossolos Regolíticos e Neossolos Quartzarênicos. Os Neossolos Litólicos são solos rasos com contato lítico dentro de 50 cm de profundidade, comumente associados com pedregosidade e rochiosidade, especialmente na Depressão Sertaneja e ocupam cerca de 19,2% da área do Semiárido (Jacomine, 1996). Os Neossolos Flúvicos são desenvolvidos a partir de sedimentos aluviais recentes, estratificados, de

modo que os horizontes ou camadas não guardam relação pedogenética entre si. Por isso, podem apresentar grandes variações morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, principalmente em profundidade, como, por exemplo, o conteúdo de argila e o de carbono orgânico. Estima-se que esses solos ocupem cerca de 2,1% do Semiárido. Os Neossolos Regolíticos apresentam-se, em geral, com cores claras ou esbranquiçadas, pouco profundos a profundos, com textura predominantemente arenosa e mais raramente média. Caracterizam-se por apresentar uma reserva de minerais primários facilmente alteráveis, geralmente, feldspatos potássicos nas frações areia e, ou, cascalho, em quantidade maior ou igual 4% (Santos et al., 2018). O material de origem está relacionado com rochas ácidas como granito ou outras com predominância de minerais félsicos. Abrangem cerca de 4,4% do Semiárido (Jacomine, 1996). Os Neossolos Quartzarênicos são solos essencialmente arenoquartzosos, normalmente profundos a muito profundos e com drenagem acentuada ou mesmo excessiva. Diferenciam-se dos Neossolos Regolíticos, entre outros atributos, pela baixa reserva de minerais primários facilmente alteráveis (< 4%) (Santos et al., 2018). Perfazem uma área ao redor de 9,3% no Semiárido (Jacomine, 1996).

Planossolos – São solos minerais, imperfeitamente drenados, que se caracterizam fundamentalmente por apresentar um horizonte B plânico abaixo de A ou de E. Tipicamente apresentam uma mudança textural abrupta ou transição abrupta na passagem do horizonte A ou E para o B plânico. Esse horizonte tipicamente apresenta-se compacto, muito duro a extremamente duro quando seco e com cores acinzentadas, ou mesmo escuras, em reflexo à deficiência de drenagem resultante da sua baixa permeabilidade (Santos et al., 2018). A grande maioria desses solos apresenta textura arenosa a média nos horizontes superficiais e média a argilosa no B plânico, tipicamente com argila de atividade alta. No domínio da Caatinga, ocupam uma área em torno de 10% (Jacomine, 1996), sendo também um valor aproximado para o contexto de toda a região semiárida.

Vertissolos – São solos minerais, argilosos a muito argilosos, com teores altos a muito altos de cátions básicos (eutróficos) e com horizonte vértico dentro de 25 cm a 100 cm de profundidade, sem qualquer tipo de horizonte B diagnóstico acima do horizonte vértico (Santos et al., 2018). Em função da presença de argilominerais expansivos (esmetitas), apresentam mudanças pronunciadas de volume conforme o conteúdo de água. No período seco, com a perda de umidade, esses solos se retraem e exibem muitas fendas na superfície do solo, que se projetam em profundidade. São extremamente duros quando secos e tornam-se muito plásticos e muito pegajosos quando molhados, sendo a permeabilidade muito lenta. Os Vertissolos são pouco expressivos no domínio da Caatinga, onde ocupam uma extensão ao redor de 1,3% (Jacomine, 1996), o que é um valor aproximado para o contexto de toda a região semiárida.

Outros solos de baixa expressão geográfica no Semiárido – Cabe destacar que, além dos solos descritos anteriormente, outras ordens de solos ocorrem na região, mas de forma muito localizada, de modo que não podem ser representados cartograficamente em escala muito pequena. São as seguintes classes de solo: Nitossolos, Plintossolos e Gleissolos. Maiores detalhes sobre esses solos estão descritos em Santos et al. (2018). Cabe destacar que os Nitossolos ocorrem, por exemplo, em ambientes onde se destacam Argissolos Vermelhos, como na mesorregião do sul cearense. Os Plintossolos têm ocorrência em ambientes diversos, por exemplo, no contexto de coberturas pedimentares sobre rochas cristalinas no extremo oeste do estado de Pernambuco, em setores dos tabuleiros costeiros, como no norte do estado do Ceará e em bordas de chapadas, como na parte leste do estado do Piauí. Já os Gleissolos têm ocorrência em ambientes de várzeas e terraços aluvionares, como na calha do Rio São Francisco e no Rio Jaguaribe (CE). Esses solos, por serem de muito baixa expressão geográfica no contexto regional, conjuntamente somam cerca de 0,2% da área do Semiárido.

Estoque de carbono

A estimativa de estoque de CO dos solos do ambiente semiárido foi realizada em diversas etapas, conforme a seguir: a) compilação de dados analíticos de perfis de solos de publicações da região Nordeste (exceto os estados do Maranhão e do Piauí) e porção Norte do estado de Minas Gerais; b) elaboração, organização e padronização de um banco de dados; c) contabilização individual do estoque de CO até 30 cm de profundidade (E_{CO30}) por perfil de solo; d) obtenção de um valor representativo de E_{CO30} por classe de solo utilizando-se métodos estatísticos; e) obtenção do estoque global de CO de solos da região semiárida com base no mapa de solos do bioma Caatinga (Araújo Filho et al., 2017).

Inicialmente, foram compilados dados de CO, densidade do solo e frações grossas (cascalho e calhau) de perfis de solo contidos em boletins de pesquisa e relatórios técnicos de levantamento de solos (Jacomine et al., 1971, 1972a, 1972b, 1973, 1975a, 1975b, 1976, 1977, 1979; Santos; Araújo Filho, 2006; Levantamento..., 2012). Além desses trabalhos, também foram extraídas informações de teses, dissertações e artigos científicos de solos da região.

As informações obtidas foram padronizadas e organizadas em um banco de dados com 649 perfis de solos, somando um total de 1.198 horizontes/camadas. Os perfis representativos selecionados foram enquadrados em 12 classes de solos do SiBCS (Santos et al., 2018). Todos os perfis foram provenientes de ambientes com a vegetação do tipo Caatinga ou transição Caatinga/floresta ou Caatinga/Cerrado. Os perfis selecionados foram aqueles com resultados analíticos de rotina mais completos, apresentando granulometria (argila, silte e areia), frações grossas (cascalho e calhau), densidade do solo (Ds), CO, SB, e que foram amostrados, na sua grande maioria, em condições de vegetação natural.

O cálculo do estoque de CO na camada de 0–30 cm de profundidade para cada um dos

perfis de solos foi realizado conforme a equação de Batjes (1996) com adaptações:

$$E_{CO30} = \sum_{i=1}^n Ds_i Li CO_i (1 - Pi)$$

em que:

E_{CO30} = estoque de CO, em kg m⁻², na camada de 0–30 cm de profundidade do solo;

Ds_i = densidade do solo, em g cm⁻³ da camada i ;

Li = espessura, em dm, da camada i ;

CO = teor de carbono orgânico, em dag kg⁻¹ da camada i ;

Pi = frações grossas (> 2 mm), em % (massa)/100, da camada i .

A camada de 0–30 cm de profundidade foi escolhida porque é a faixa de solo onde se concentra a maior parte do CO, ocorre maior alteração pelas atividades antrópicas e pode ser comparada com outros inventários (Batjes 1996; Bernoux et al., 2002; Fidalgo et al., 2012). O CO contido na liteira ou serrapilheira (horizonte O), que tem grande variação temporal, não foi contabilizado.

Um componente importante da equação de estoque de CO proposta por Batjes (1996) é a pedregosidade do solo. Como citado, os solos do Semiárido possuem grande parte de seus atributos relacionados ao material de origem (rochas ou sedimentos). Assim, são comuns a presença de frações grossas (> 2 mm) na massa do solo em quantidade variável. Tendo em vista que os fragmentos de rochas possuem muito pouco CO em sua composição, é necessária uma correção para se evitar uma superestimativa do estoque. Para se ter uma ideia, o conteúdo das frações cascalho e calhau dos horizontes selecionados varia de 10 g kg⁻¹ a 680 g kg⁻¹ de solo, e mais da metade dos horizontes/camadas do banco de dados (67%) tiveram os valores de estoque de CO corrigidos.

Os valores de CO empregados na estimativa do E_{CO30} correspondem àqueles determinados exclusivamente pelo método de oxidação por via úmida com utilização do dicromato de po-

tássio. Esses valores foram utilizados em função da disponibilidade e uniformidade dos dados, mesmo sabendo-se que não representam a totalidade de carbono orgânico dos solos, pois não contabilizam interações da matéria orgânica fortemente associadas com a fase mineral e formas altamente recalcitrantes e inertes (exemplo: fragmentos de carvão) (Chatterjee et al., 2009).

A Ds é outro componente crítico para o cálculo do estoque de CO e de difícil obtenção em certas classes de solos, particularmente naquelas pedregosas. A Ds é necessária para converter o conteúdo de CO em dag kg⁻¹ para massa de CO por unidade de área (kg m⁻²). Para 64% dos perfis de solo do banco de dados, os valores de Ds foram estimados por meio de uma equação de pedotransferência. A referida equação foi a proposta por Benites et al. (2006), que explica 66% da variação da densidade dos solos brasileiros, conforme apresentado a seguir:

$$Ds = 1,56 - (0,0005 \text{ argila}) - (0,01 \text{ CO}) + (0,0075 \text{ SB})$$

em que:

Ds = densidade do solo em g cm⁻³;

argila = argila total em g kg⁻¹;

CO = carbono orgânico em g kg⁻¹;

SB = soma de bases trocáveis em cmol_c kg⁻¹.

Calculado o E_{CO30} de cada um dos 649 perfis de solo do banco de dados, partiu-se para a obtenção do valor representativo por classe de solo por meio de testes estatísticos. Para a escolha dos mesmos, foram verificados os critérios para a aplicação de testes paramétricos ou não paramétricos (Field, 2009). Todas as análises estatísticas foram realizadas com uso do software R (Dalgaard, 2008).

A análise gráfica dos dados (Figura 4) mostra uma distribuição assimétrica à esquerda, o que sugere uma distribuição divergente da normalidade. Para confirmação dessa suposição, foi realizado o teste Shapiro-Wilk, cuja hipótese de nulidade é de que os dados são normalmente

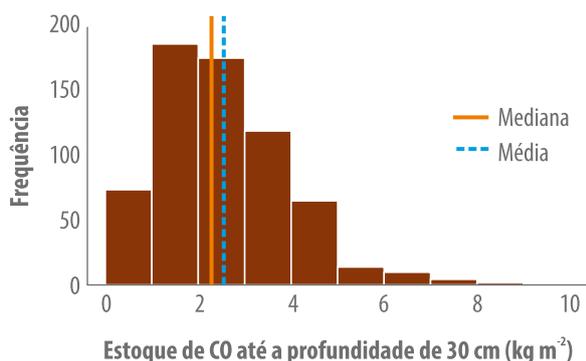


Figura 4. Histograma do estoque de carbono orgânico (CO) até a profundidade de 30 cm (E_{CO30}) de 649 perfis de solos do Semiárido brasileiro.

distribuídos. Ao nível de significância de 5%, o valor- p encontrado ($<0,001$) foi altamente significativo e, por isso, rejeitou-se a hipótese nula. Além disso, foi verificada a homogeneidade de variâncias entre as classes de solo por meio do teste de Bartlett (Bartlett, 1937; Dalgaard, 2008), cuja hipótese nula é de que os dados têm a mesma variância. Novamente, ao nível de

5% de significância foi encontrado um valor- p ($<0,001$), altamente significativo, rejeitando a hipótese de nulidade e concordando com a violação da suposição de normalidade. Portanto, o desvio da normalidade e a heterogeneidade de variância apontam para a necessidade de utilização de testes não paramétricos. Nesse caso, a medida de tendência central que melhor representa as informações do estoque de CO das diferentes classes de solo é a mediana, e não a média. Em consequência dessas avaliações, o teste utilizado na verificação da hipótese nula de igualdade entre as medianas do estoque de carbono por classe de solo até 30 cm de profundidade foi o teste de Kruskal-Wallis (Dalgaard, 2008). A representação gráfica e os valores das medianas dos E_{CO30} por classe de solo são apresentadas na Figura 5 e Tabela 1, respectivamente.

Para os fins práticos deste trabalho, as unidades de mapeamento que integram o mapa de solos do bioma Caatinga (Araújo Filho et al., 2017) fo-

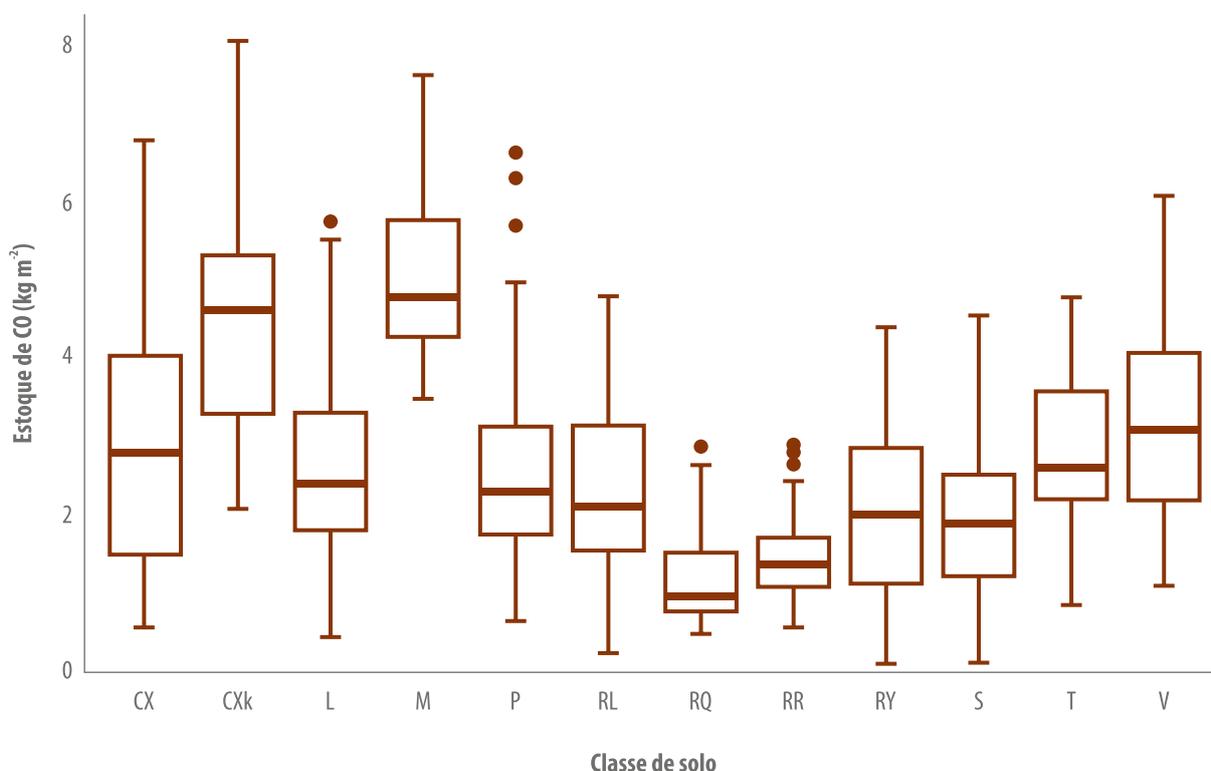


Figura 5. Boxplot do estoque de carbono orgânico (CO) em $kg\ m^{-2}$ por classe de solo até 30 cm de profundidade no Semiárido brasileiro.

CX: Cambissolos Háplicos (n=37); CXk: Cambissolos Háplicos Carbonáticos (n=28); L: Latossolos (n=80); M: Chernossolos (n=18); P: Argissolos (n=126); RL: Neossolos Litólicos (n=40); RQ: Neossolos Quartzarênicos (n=40); RR: Neossolos Regolíticos (n=40); RY: Neossolos Flúvicos (n=40); S: Planossolos (n=80); T: Luvisolos (n=80); V: Vertissolos (n=40).

Tabela 1. Síntese da estatística descritiva com valores de tendência central e dispersão dos dados de estoque de carbono (kg m^{-2}) até 30 cm de profundidade em solos do Semiárido brasileiro.

| Classe de solo ⁽¹⁾ | Número de perfis | Média | Desvio-padrão | Mediana | Intervalo interquartil | Máximo | Mínimo |
|-------------------------------|------------------|-------|---------------|---------|------------------------|--------|--------|
| CX | 37 | 2,90 | 1,53 | 2,82 | 2,55 | 6,78 | 0,58 |
| CXk | 28 | 4,51 | 1,71 | 4,60 | 2,01 | 8,07 | 2,08 |
| L | 80 | 2,60 | 1,17 | 2,41 | 1,49 | 5,75 | 0,46 |
| M | 18 | 5,01 | 1,17 | 4,81 | 1,38 | 7,64 | 3,50 |
| P | 126 | 2,53 | 1,15 | 2,32 | 1,39 | 6,63 | 0,67 |
| RL | 40 | 2,30 | 1,09 | 2,09 | 1,56 | 4,79 | 0,29 |
| RQ | 40 | 1,22 | 0,62 | 0,96 | 0,80 | 2,89 | 0,50 |
| RR | 40 | 1,50 | 0,55 | 1,40 | 0,62 | 2,89 | 0,58 |
| RY | 40 | 2,00 | 1,16 | 1,98 | 1,67 | 4,39 | 0,15 |
| S | 80 | 1,95 | 0,94 | 1,90 | 1,31 | 4,53 | 0,14 |
| T | 80 | 2,81 | 0,92 | 2,62 | 1,36 | 4,77 | 0,85 |
| V | 40 | 3,18 | 1,18 | 3,07 | 1,85 | 6,08 | 1,09 |

⁽¹⁾CX: Cambissolos Háplicos; CXk: Cambissolos Háplicos Carbonáticos; L: Latossolos; M: Chernossolos; P: Argissolos; RL: Neossolos Litólicos; RQ: Neossolos Quartzarênicos; RR: Neossolos Regolíticos; RY: Neossolos Flúvicos; S: Planossolos; T: Luvissolos; V: Vertissolos.

ram organizadas e sintetizadas em 12 domínios de solos: Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Flúvicos, Vertissolos, Luvissolos, Chernossolos, Planossolos, Latossolos, Argissolos, Cambissolos Háplicos e Cambissolos Háplicos Carbonáticos. Esses domínios correspondem a grandes ambientes onde predomina um determinado tipo de solo.

Por fim, o cálculo do estoque global de CO foi realizado por meio do somatório do E_{CO30} de cada um dos domínios do mapa de solos do bioma Caatinga (Araújo Filho et al., 2017), conforme a equação a seguir:

$$M_{CO30} = \sum_{i=1}^n A_i \times t$$

em que:

M_{CO30} = massa total de carbono orgânico (Pg) na camada de 0–30 cm de profundidade;

n = número total de domínios ($n = 12$), exceto corpos d'água;

A_i = área dos domínios;

t = valor representativo de E_{CO30} para cada um dos domínios de solo.

Estoque global de carbono orgânico em solos do Semiárido

Em geral, as condições ambientais prevalentes na região semiárida brasileira não são favoráveis à acumulação em larga escala do CO nos solos (Bernoux et al., 2002). Quando comparada com outras formações, a Caatinga tem menor potencial de produção e aporte de biomassa vegetal, fonte primária da matéria orgânica do solo (MOS) e, conseqüentemente, do CO. Chuvas irregulares e torrenciais com elevado poder de erosividade removem periodicamente parte da camada superficial do solo, e a alta temperatura do ar contribui para que haja uma eficiente

ciclagem dos compostos orgânicos restantes no solo. Ambas as situações contribuem para a perda de CO em função da erosão hídrica e emissão de CO₂ para a atmosfera. Além disso, devem ser considerados os impactos negativos causados pela atividade humana ao longo de centenas de anos de ocupação, que levam a perda significativa de CO, como é o caso das práticas de agricultura itinerante, queimadas, pecuária extensiva e extrativismo (Salcedo; Sampaio, 2008).

Apesar das condições adversas para acumulação de CO em larga escala, os estoques desse elemento nos solos da região semiárida não podem ser menosprezados. Conforme estimado neste trabalho, a massa total de carbono orgânico até 30 cm de profundidade (M_{CO30}) é da ordem de 2,20 Pg. Esse valor é próximo àquele encontrado por Fidalgo et al. (2012) para solos do bioma Caatinga sob vegetação original (1,95 Pg) e corresponde a cerca de 6% do estoque de CO dos solos do Brasil ($36,4 \pm 3,4$ Pg) (Bernoux et al., 2002), ambos estimados na camada de 0–30 cm.

Cabe destacar que o valor de M_{CO30} de solos do Semiárido estimado corresponde a um potencial de acumulação de CO em condição natural, pois a grande maioria dos dados utilizados foram compilados de perfis coletados sob vegetação de Caatinga. Diante da dinâmica de uso e manejo das terras do Semiárido, é oportuno ressaltar que os valores de estoque de CO do solo podem ser modificados. Áreas desmatadas e sob agricultura dependente de chuva comumente possuem valores de CO inferiores àqueles das áreas sob vegetação natural (Salcedo; Sampaio, 2008; Fracetto et al., 2012; Araújo Filho et al., 2018). Por outro lado, em áreas sob agricultura irrigada, os solos podem armazenar maior conteúdo de CO em comparação com a vegetação da Caatinga, conforme foi observado por Amaral et al. (2015) em um Neossolo Quartzarênico no sertão pernambucano.

Estoque de carbono orgânico por classe e domínio de solos

Uma síntese da estatística descritiva do estoque de CO por classe de solos do Semiárido brasileiro consta na Tabela 1. Entre os 649 perfis estudados, o valor máximo de E_{CO30} foi observado em um Cambissolo Háplico Tb Eutrófico ($8,07 \text{ kg m}^{-2}$), derivado da alteração de siltito com influência de calcário, sob pecuária extensiva na Caatinga, localizado em Claro dos Poções, MG. Por outro lado, o valor mínimo de E_{CO30} foi verificado em um Planossolo Háplico Eutrófico solódico ($0,14 \text{ kg m}^{-2}$), de textura arenosa cascalhenta/média, sob cultivo de subsistência (milho e feijão), situado em Remígio, PB.

Como citado, o valor que melhor representa os E_{CO30} do solo desse conjunto de dados é a mediana, cujos valores variaram de $4,81 \text{ kg m}^{-2}$ nos Chernossolos até $0,96 \text{ kg m}^{-2}$ nos Neossolos Quartzarênicos. Não obstante, a maior parte das classes de solo apresenta valor de mediana inferior a 3 kg m^{-2} . Esses valores representativos de E_{CO30} estão de acordo com os relatados por Bernoux et al. (2002), Salcedo e Sampaio (2008) e Fidalgo et al. (2012) para os solos da região semiárida brasileira. As classes de solos, em ordem decrescente de E_{CO30} , são as seguintes: Chernossolos (M), Cambissolos Háplicos Carbonáticos (CXk), Vertissolos (V), Cambissolos Háplicos (CX), Luvisolos (T), Latossolos (L), Argissolos (P) e Neossolos Litólicos (RL), Neossolos Flúvicos (RY), Planossolos (S), Neossolos Regolíticos (RR) e, por fim, Neossolos Quartzarênicos (RQ) (Tabela 1).

Buscando-se verificar semelhanças ou diferenças entre classes de solos com relação ao E_{CO30} , foi aplicado o teste de Nemenyi para comparações múltiplas de medianas (Sachs, 1997). Apoiado nesse teste (Tabela 2) e visando uma representação gráfica simplificada dos resultados, foram organizados quatro grandes agrupamentos de domínios de solos, destacados em seguida:

Grupo 1 – Compreende Chernossolos (M), Cambissolos Háplicos Carbonáticos (CXk) e Vertissolos (V), que apresentam os maiores valores de mediana de E_{CO30} ($> 3 \text{ kg m}^{-2}$). Não obstante, ocupam uma área conjunta relativamente pequena da região semiárida, cerca de 5,4% (53.179 km²). As áreas de ocorrência desses solos concentram-se nos estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Bahia, Sergipe e norte de Minas Gerais (Figura 6), associados na maioria das situações com material de origem essencialmente carbonático (exemplo: Calcário Jandaíra, RN e CE; Calcário Caatinga, BA). Os mais elevados valores de E_{CO30} no Semiárido estão relacionados com características intrínsecas dos solos, como a elevada fertilidade química natural, textura argilosa a muito argilosa e a mineralogia prevalente do tipo 2:1 (argilas do grupo das esmectitas). Essas variáveis favorecem a forte interação de compostos orgânicos em alteração com a fase mineral reativa, o que se configura num importante mecanismo de estabilização físico-químico do carbono orgânico (Sollins et al., 1996).

Num inventário realizado em escala global, foram encontradas médias de E_{CO30} de 6 kg m⁻² para *Chernozems*, 4,5 kg m⁻² para *Vertisols* e 3 kg m⁻² para *Cambisols Calcic* (Batjes, 1996). Esses valores são relativamente superiores aos estimados neste trabalho para Chernossolos (4,81 kg m⁻²) e Vertissolos (3,07 kg m⁻²), porém inferior ao estimado para os Cambissolos Háplicos Carbonáticos (4,60 kg m⁻²) do Semiárido brasileiro.

Grupo 2 – Formado pelos domínios de Cambissolos Háplicos (CX), Luvisolos (T), Latossolos (L), Argissolos (P) e Neossolos Litólicos (RL). Apresentam mediana de $E_{CO30} > 2$ e $\leq 3 \text{ kg m}^{-2}$ e são os mais representativos, em termos de área, no contexto do ambiente semiárido. Abrangem cerca de 71,7% das terras (704.518 km²) e distribuem-se por todos os estados da região (Figura 6). Justificativas para explicar esse agrupamento são difíceis de estabelecer, pois reúnem ambientes, solos e usos bastante diferenciados. Não obstante, deve ser levado em consideração que o estoque de CO do solo cor-

responde a um balanço dinâmico de entradas e saídas dos compostos orgânicos, os quais são dependentes da atuação conjunta de mecanismos de estabilização (recalcitrância intrínseca, proteção física no interior de agregados e interação físico-química com a fase mineral), além de histórico de uso e manejo das terras e da erodibilidade. Os Cambissolos Háplicos, Luvisolos, Latossolos e Argissolos, em geral, possuem um histórico de uso agrícola mais intensificado em relação aos Neossolos Litólicos. Esse último comumente é encontrado em posições do relevo mais acidentados, associados com afloramentos de rochas e pedregosidade, o que os coloca em posição desfavorável ao uso. Portanto, são comuns encontrar ainda na atualidade áreas de Neossolo Litólico em condição de preservação ou sob usos menos intensivos, a exemplo do extrativismo (Araújo Filho et al., 2018). Além disso, ressalta-se a profundidade de 30 cm empregada neste trabalho, a qual colabora para equiparar solos contrastantes (exemplo: Latossolo versus Neossolo Litólico). Para as demais classes de solo, a contabilização do CO em maior profundidade efetiva promoverá aumento do estoque, o que não guardará as mesmas proporções com o Neossolo Litólico, pois o contato com a rocha são, nesta classe, estará dentro de 50 cm de profundidade. Os Luvisolos apresentam média a alta fertilidade natural e argilas com atividade alta, que são características favoráveis ao acúmulo de CO. Em contraposição, possuem elevada susceptibilidade à erosão hídrica (exemplo: perda do horizonte superficial), são bastante explorados em atividades agrícolas e possuem expressiva quantidade de cascalho e calhaus na superfície e no pedon, o que exige correção da estimativa do estoque de CO. Em função dessas características, esses solos ficaram reunidos em um mesmo grupo (Figura 6 e Tabela 2).

Grupo 3 – Neossolos Flúvicos (RY), Planossolos (S) e Neossolos Regolíticos (RR) compõem a terceira categoria de E_{CO30} com valores de mediana > 1 e $\leq 2 \text{ kg m}^{-2}$. Ocupam aproximadamente 14,5% (142.325 km²) das terras do ambiente semiárido e distribuem-se por todos os estados (Figura 6). Os Neossolos Flúvicos (ou solos de

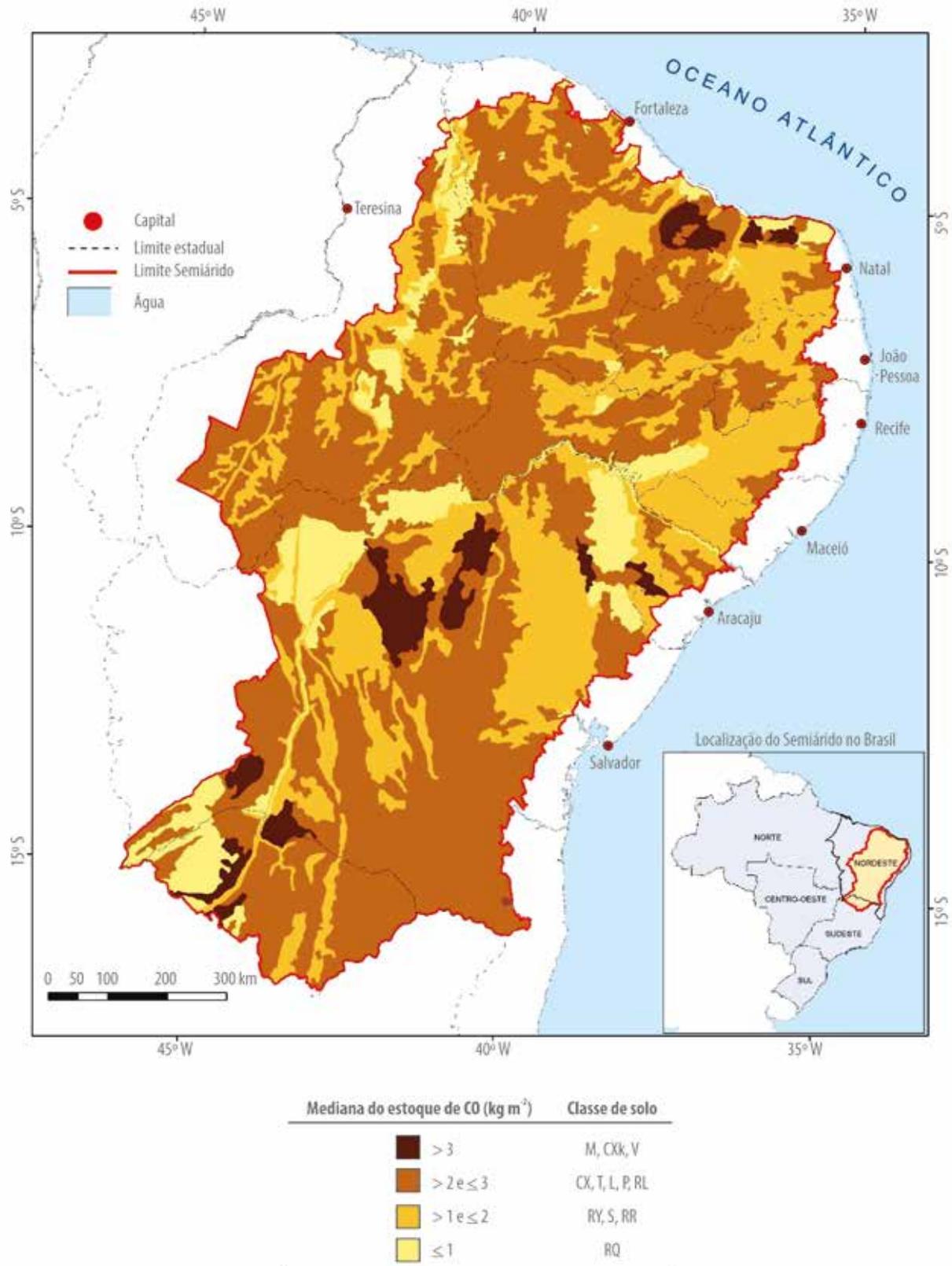


Figura 6. Mapa do estoque de carbono orgânico (CO) na camada de 0 a 30 cm de profundidade por grupos de domínios de solos do Semiárido brasileiro.

M: Chernossolos; CXk: Cambissolos Háplicos Carbonáticos; V: Vertissolos; CX: Cambissolos Háplicos; T: Luvisolos; L: Latossolos; P: Argissolos; RL: Neossolos Litólicos; RY: Neossolos Flúvicos; S: Planossolos; RR: Neossolos Regolíticos; RQ: Neossolos Quartzarênicos.

Tabela 2. Probabilidade de significância (valor-p) na comparação de medianas do estoque de carbono orgânico (CO) até 30 cm de profundidade em diferentes classes de solos do Semiárido brasileiro pelo teste de Nemenyi (Sachs, 1997).

| Classe de solo ⁽¹⁾ | CX | CXk | L | M | P | RL | RQ | RR | RY | S | T |
|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|------------------|-------|
| CXk | 0,027 | | | | | | | | | | |
| L | 1,000 | <0,001 | | | | | | | | | |
| M | 0,002 | 0,994 | <0,001 | | | | | | | | |
| P | 0,992 | <0,001 | 1,000 | <0,001 | | | | | | | |
| RL | 0,891 | <0,001 | 0,992 | <0,001 | 0,999 | | | | | | |
| RQ | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | | | | | |
| RR | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | 0,036 | 0,997 | | | | |
| RY | 0,224 | <0,001 | 0,411 | <0,001 | 0,543 | 0,996 | 0,043 | 0,482 | | | |
| S | 0,035 | <0,001 | 0,049 | <0,001 | 0,064 | 0,934 | 0,020 | 0,431 | 1,000 | | |
| T | 1,000 | 0,017 | 0,949 | <0,001 | 0,651 | 0,442 | <0,001 | <0,001 | 0,017 | <0,001 | |
| V | 0,986 | 0,423 | 0,513 | 0,053 | 0,204 | 0,126 | <0,001 | <0,001 | 0,003 | <0,001 | 0,996 |

⁽¹⁾ CX: Cambissolos Háplicos; CXk: Cambissolos Háplicos Carbonáticos; L: Latossolos; M: Chernossolos; P: Argissolos; RL: Neossolos Litólicos; RQ: Neossolos Quartzarênicos; RR: Neossolos Regolíticos; RY: Neossolos Flúvicos; S: Planossolos; T: Luvisolos; V: Vertissolos.

Valores destacados em negrito apresentam diferença estatística significativa (valor-p < 0,01 - altamente significativo ao nível de 1% de probabilidade; valor-p < 0,05 - significativo ao nível de 5% de probabilidade).

aluvião) ocorrem nas margens de rios e riachos e são bastante explorados na região Nordeste por meio da prática de agricultura de vazante, dependente de chuvas e de pequenas irrigações. Passada a estação chuvosa, os Neossolos Flúvicos mantêm a umidade por um maior período de tempo em relação aos solos circunvizinhos. Sendo assim, os terrenos aluvionares são bastante explorados pela atividade agrícola, de modo que os conteúdos de CO tendem a ser reduzidos em relação aos níveis naturais (originais). As áreas recobertas com Neossolos Regolíticos também tendem a ser muito explorada com culturas de subsistência (exemplo: mandioca, milho, feijão e fruteiras) em razão da sua profundidade efetiva e reserva de nutrientes para os vegetais (Salcedo; Sampaio, 2008). Salvo pequenas exceções, são solos de textura arenosa e pobres em CO (teor < 0,4 dag kg⁻¹ de solo). Os Planossolos apresentam um forte contraste textural entre horizontes, o que acarreta dificuldades de uso e manejo. Normalmente são utilizados para pecuária extensiva, com pas-

tagem e/ou a manutenção parcial de espécies arbóreas (raleio da Caatinga). Em geral, os horizontes superficiais do Planossolo (A ou A+E) possuem textura arenosa, sendo relativamente semelhantes aos dos Neossolos Regolíticos.

Grupo 4 – Os Neossolos Quartzarênicos (RQ) correspondem a quarta categoria de E_{CO30} com valores de mediana ≤ 1 kg m⁻². As maiores ocorrências estão localizadas nos estados da Bahia, Pernambuco, Ceará e norte de Minas Gerais (Figura 6) e abrangem 8,4% (82.541 km²) do Semiárido. São solos essencialmente arenoquartzosos, pobres em CO (teor < 0,3 dag kg⁻¹ de solo) e de fertilidade natural inferior aos Neossolos Regolíticos e, por conseguinte, de menor aporte de biomassa vegetal. Esses solos encontram-se em extensas áreas de relevo plano a suave ondulada, e geralmente são derivados de sedimentos e rochas areníticas quartzosas. O baixo teor de argila, aliado ao clima quente, favorece a rápida ciclagem dos compostos orgânicos, especialmente das formas mais lábeis. Assim,

apenas compostos orgânicos altamente recalcitrantes, em pequena quantidade, persistem nesse solo (Sollins et al., 1996). Em avaliação global, foi constatado um valor médio de E_{CO_3O} de $1,3 \text{ kg m}^{-2}$ para os *Arenosols* (Batjes, 1996), sendo relativamente superior ao estimado neste estudo ($0,96 \text{ kg m}^{-2}$).

Carbono inorgânico

Solos formados a partir de rochas e sedimentos calcários em climas secos, além do estoque de carbono na forma orgânica, também compreendem carbono armazenado na forma inorgânica (CI) (Nelson; Sommers, 1996). O CI é mais inerte que o CO e ocorre imobilizado predominantemente em minerais carbonáticos (calcita e dolomita). Solos dessa natureza podem, inclusive, possuir um conteúdo de CI superior ao de CO. Além dos minerais carbonáticos, o CI pode estar presente em solos halomórficos relacionados com sais de carbonato (CO_3^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^-) (Nelson; Sommers, 1996). Cabe destacar que o CI não foi contabilizado neste estudo em razão da metodologia analítica utilizada, que é específica para determinação do CO.

Solos com quantidade significativa de CI no Semiárido brasileiro, como os Cambissolos Háplicos Carbonáticos e alguns Chernossolos, ocorrem com grande expressão geográfica no oeste baiano, no norte de Minas Gerais e na Chapada do Apodi, entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará.

Considerações finais

A região semiárida possui grande diversidade de ambientes e solos e, em consequência, apresenta diferentes potenciais de acumulação de CO. Os maiores valores de CO na camada de 0–30 cm de profundidade (mediana de $CO > 3 \text{ kg m}^{-2}$) dos solos estão relacionados com Cambissolos, Chernossolos e Vertissolos, desenvolvidos a partir da alteração de rochas e sedimentos calcários, e abrangem uma área de aproximadamente 53.179 km^2 (5,4%). Esse

agrupamento de domínios de solos ocorre de forma descontínua nos estados do Rio Grande do Norte, na interface do Rio Grande do Norte com o Ceará, no oeste da Bahia, em Sergipe e no norte de Minas Gerais. O maior grupo de domínios de solos é formado por Cambissolos Háplicos, Luvisolos, Latossolos, Argissolos e Neossolos Litólicos, com mediana de estoque de $CO > 2$ e $\leq 3 \text{ kg m}^{-2}$. Compõem a maior parte da região semiárida e distribui-se em todos os estados, com uma extensão de 704.518 km^2 (71,7%). Neossolos Flúvicos, Planossolos e Neossolos Regolíticos, embora com características morfológicas distintas, apresentam mediana de estoque de CO semelhante, na faixa de > 1 e $\leq 2 \text{ kg m}^{-2}$. Esse grupo de domínios de solos ocupa uma área de cerca de 142.325 km^2 (14,5%) e também distribui-se em todos os estados. Solos com menor capacidade de estoque de CO (mediana $\leq 1 \text{ kg m}^{-2}$) estão relacionados com Neossolos Quartzarênicos, formados a partir de sedimentos quartzosos e/ou de rochas areníticas. Compreende uma área de 82.541 km^2 (8,4%) e ocorre distribuído principalmente em bacias sedimentares localizadas no Piauí, Pernambuco, Bahia e norte de Minas Gerais.

Por fim, o estoque global de CO de solos do ambiente semiárido na camada de 0–30 cm foi estimado em $2,20 \text{ Pg}$. Esse valor corresponde a um potencial de acumulação de CO em condição natural, pois a grande maioria dos dados utilizados foram oriundos de perfis coletados sob vegetação de Caatinga.

Referências

- AHMAD, N.; MERMUT, A. **Vertisols and technologies for their management**. Amsterdam: Elsevier, 1996. 548 p. (Development in Soil Science, 24).
- AMARAL, A. J.; PÉREZ, D. V.; OLIVEIRA NETO, M. B.; HERNANI, L. C.; CUNHA, T. J. F.; MELO, A. S. Atributos de um Neossolo Quartzarênico sob mangueira irrigada e sob vegetação de Caatinga: estudo comparativo em Petrolina-PE. In: CASTRO, S. S.; HERNANI, L. C. (ed.). **Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 207-239.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; ARAÚJO, M. S. B.; BURGOS, N.; MARQUES, F. A. Solos da Caatinga. In: CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R.

- (ed.). **Pedologia: solos dos Biomas Brasileiros**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017. p. 227-260.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; BURGOS, N.; LOPES, O. F.; SILVA, F. H. B. B.; MEDEIROS, L. A. R.; MELO FILHO, H. F. R.; PARAHYBA, R. B. V.; CAVALCANTI, A. C.; OLIVEIRA NETO, M. B.; SILVA, F. B. R.; LEITE, A. P.; SANTOS, J. C. P.; SOUSA NETO, N. C.; SILVA, A. B.; LUZ, L. R. Q. P.; LIMA, P. C.; REIS, R. M. G.; BARROS, A. H. C. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 378 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa, 11).
- ARAÚJO FILHO, J. C.; RIBEIRO, M. R.; MARQUES, F. A.; LOPES, H. L. Solos. In: TORRES, F. M.; PFALTZGRAFF, P. A. S. (ed.). **Geodiversidade do estado de Pernambuco**. Recife: CPRM, 2014. p. 109-138.
- ARAÚJO FILHO, R. N.; FREIRE, M. B. G. S.; WILCOX, B. P.; WEST, J. B.; FREIRE, F. J.; MARQUES, F. A. Recovery of carbon stocks in deforested Caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management**, v. 407, p. 210-220, Jan. 2018. DOI: [10.1016/j.foreco.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.002).
- BARTLETT, M. S. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society of London Series A**, v. 160, p. 268-282, 1937. DOI: [10.1098/rspa.1937.0109](https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0109).
- BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the word. **European Journal of Soil Science**, v. 47, p. 151-163, June 1996. DOI: [10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x).
- BENITES, V. M.; MACHADO, P. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E.; LIMA, C. X. **Funções de Pedotransferência para estimativa da densidade dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 30 p. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 104).
- BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil soil carbon stocks. **Soil Science Society of American Journal**, v. 66, p. 888-896, May 2002. DOI: [10.2136/sssaj2002.8880](https://doi.org/10.2136/sssaj2002.8880).
- BONNEAU, M.; SOUCHIER, B. **Pédologie: 2 constituants et propriétés du sol**. Paris: Masson, 1994. 665 p.
- BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 7, p. 221-277, Jan. 2011.
- BRASIL. Resolução nº 115, de 23 de novembro de 2017. **Diário Oficial da União**, 25 dez. 2017. Seção 1, p. 26-34.
- CHATTERJEE, A.; LAL, R.; WIELOPOLSKI, L.; MARTIN, M. Z.; EBINGER, M. H. Evaluation of different soil carbon determination methods. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 28, n. 3, p. 164-178, Apr. 2009. DOI: [10.1080/07352680902776556](https://doi.org/10.1080/07352680902776556).
- CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; RUIZ, H. A.; BASTOS, R. S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das várzeas de Sousa (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 311-324, 2003. DOI: [10.1590/S0100-06832003000200011](https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200011).
- DALGAARD, P. **Introductory statistics with R**. 2. ed. Copenhagen: Springer, 2008. 364 p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Quinta reunião de classificação, correlação e aplicação de levantamentos de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1998. 127 p.
- FERNANDES, L. A. C.; RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B.; FERREIRA, R. F. A. L. Caracterização e classificação de solos de uma litotoposequência do Projeto Xingó-SE. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 2, p. 192-201, abr./jun. 2010. DOI: [10.5039/agraria.v5i2a675](https://doi.org/10.5039/agraria.v5i2a675).
- FERREIRA, S. E. M.; FERREIRA, M. G. V. X. Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um Vertissolo no Semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 779-91, jul./ago. 2009. DOI: [10.1590/S0100-06832009000400004](https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400004).
- FIDALGO, E. C. C.; BENITES, V. de M.; WADT, P. G. S.; COELHO, R. M.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. A. Estoque de carbono com base no levantamento de solos do Brasil. In: LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. A.; URQUIAGA, S. (ed.). **Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p. 17-32.
- FIELD, A. **Descobrimo a estatística usando o SPSS**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 688 p.
- FRACETTO, F. J. C.; FRACETTO, G. G. M.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J.; SIQUEIRA NETO, M. Estoques de carbono e nitrogênio no solo cultivado com mamona na Caatinga. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1545-1552, 2012. DOI: [10.1590/S0100-06832012000500019](https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500019).
- JACOMINE, P. K. T. (coord.). **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do estado do Piauí**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS; Recife: Sudene, 1986. 2 v. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim de pesquisa, 36; SUDENE. Recursos de solos, 18).
- JACOMINE, P. K. T. Solos sob Caatingas: características e uso agrícola. In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (ed.). **O solo nos domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p. 95-111.
- JACOMINE, P. K. T.; ALMEIDA, J. C.; MEDEIROS, L. A. R. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Ceará**. Recife: DNPEA: Sudene, 1973. 2 v. (DNPEA. Boletim técnico, 28; SUDENE. Pedologia, 16).
- JACOMINE, P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; BURGOS, N.; PESSOA, S. C. P.; SILVEIRA, C. O. da. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. Recife: DNPEA: SUDENE, 1972a. 2 v. (DNPEA. Boletim técnico, 26; SUDENE. Pedologia, 14).
- JACOMINE, P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; FORMIGA, R. A.; SILVA, F. B. R. e; BURGOS, N.; MEDEIROS, L. A. R.; LOPES,

- O. F.; MELO FILHO, H. F. R. de; PESSOA, S. C. P.; LIMA, P. C. de. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Norte de Minas Gerais, área de atuação da SUDENE**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS; Recife: Sudene, 1979. 407 p. il. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim técnico, 60; SUDENE. Recursos de solos, 12).
- JACOMINE, P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; PESSÔA, S. C. P.; SILVEIRA, C. O. da. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Alagoas**. Recife: Sudene: EMPBRAPA-CPP, 1975a. 532 p. (SUDENE. Recursos de solos, 5; EMBRAPA-CPP. Boletim técnico, 35).
- JACOMINE, P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; RIBEIRO, M. R.; MONTENEGRO, J. O.; BURGOS, N.; MELO FILHO, H. F. R. de; FORMIGA, R. A. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos da margem esquerda do Rio São Francisco Estado da Bahia**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS; Recife: Sudene, 1976. 404 p. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim técnico, 38; SUDENE. Recursos de solos, 7).
- JACOMINE, P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; SILVA, F. B. R. e; MONTENEGRO, J. O.; FORMIGA, R. A.; BURGOS, N.; MELO FILHO, H. F. R. de. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos da margem direita do Rio São Francisco Estado da Bahia**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS; Recife: Sudene, 1977. 2 v. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim técnico, 52; SUDENE. Recursos de solos, 10).
- JACOMINE, P. K. T.; MONTENEGRO, J. O.; RIBEIRO, M. R.; FORMIGA, R. A. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Sergipe**. Recife: Sudene: EMBRAPA-CPP, 1975. 506 p. (SUDENE. Recursos de solos, 6; EMBRAPA-CPP. Boletim técnico, 36).
- JACOMINE, P. K. T.; OLIVEIRA, L. B.; CAVALCANTI, A. C. (ed.). **Guia de excursão**. Recife: EMBRAPA-SNLCS: SBCS, 1989. 72 p.
- JACOMINE, P. K. T.; RIBEIRO, M. R.; MONTENEGRO, J. O.; SILVA, A. P. da; MELO FILHO, H. F. R. de. **I. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado da Paraíba**. II. Interpretacao para uso agrícola dos solos do Estado da Paraíba. Recife: DNPEA: Sudene, 1972b. 683 p. (DNPEA. Boletim técnico, 15; SUDENE. Pedologia, 8).
- JACOMINE, P. K. T.; SILVA, F. B. R. e; FORMIGA, R. A.; ALMEIDA, J. C.; BELTRÃO, V. de A.; PESSÔA, S. C. P.; FERREIRA, R. C. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte**. Recife: DNPEA: Sudene, 1971. 531 p. (DNPEA. Boletim técnico, 21; SUDENE. Pedologia, 9).
- LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, v. 528, p. 60-68, 2015.
- LEVANTAMENTO de reconhecimento de média intensidade dos solos: mesorregião do sul cearense. Fortaleza: Funceme, 2012. 280 p.
- LUZ, L. R. Q. P.; SANTOS, M. C.; MERMUT, A. R. Pedogênese em uma topossequência do semi-árido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 16, p. 95-102, 1992.
- LYRA, M. C. C. P. **Caracterização de Vertissolos em projetos de irrigação na região do baixo médio São Francisco**. 1993. 227 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- NAHON, D.; TARDY, Y. The ferruginous laterites. In: BUTT, C. R. M.; ZEEGERS, H. (ed.). **Regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains**. Amsterdam: Elsevier, 1992. p. 41-77. (Handbook of Exploration Geochemistry, 4).
- NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: BLACK, C. A. (ed.). **Methods of soil analysis: part 3 - chemical methods**. Madison: Soil Science of America and American Society of Agronomy, 1996. p. 961-1010.
- PRIBYL, D. W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion fator. *Geoderma*, v. 156, p. 75-83, May 2010. DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.02.003](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003).
- SACHS, L. **Angewandte statistik**. Berlim: Springer, 1997. 885 p.
- SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Matéria orgânica do solo no Bioma Caatinga. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 419-441.
- SANTOS, H. G. dos; CARVALHO JÚNIOR, W. de; DART, R. de O.; ÁGLIO, M. L. D.; SOUZA, K. S. de; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTIN, A. L. da S.; OLIVEIRA, A. P. de. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. Escala 1:5.000.000. (Embrapa Solos. Documentos, 130). Disponível em: ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/123772/1/DOC-130-O-novo-mapa-de-solo-do-Brasil.pdf. Acesso em: 2 jul. 20
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.
- SANTOS, J. C. do; ARAÚJO FILHO, J. C. de. (ed.). **Avaliação detalhada, detalhada do potencial de terras para irrigação nas áreas de reassentamento de colonos do Projeto Jusante, Glória, BA**. Recife: Embrapa Solos/UEP, 2006. 261 p.
- SILVA, F. B. R.; RICHÉ, G. R.; TONNEAU, J. P.; SOUZA NETO, N. C.; BRITO, L. T. L.; CORREIA, R. C.; CAVALCANTI, A. C.; SILVA, F. H. B. B.; SILVA, A. B.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LEITE, A. P. **Zoneamento agroecológico do Nordeste: diagnóstico do quadro natural e agrossocioeconômico**. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, 1993. 2 v. (EMBRAPA-CPATSA. Documentos, 80).
- SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 276-374.

SILVA, P. C. G. da; MOURA, M. S. B.; KIILL, L. H. P.; BRITO, L. T. L.; PEREIRA, L. A.; SÁ, I. B.; CORREIA, R. C.; TEIXEIRA, A. H. C.; CUNHA, T. J. F.; GUIMARÃES FILHO, C. Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. In: SÁ, I. B.; SILVA, P. C. G. da. (ed.). **Semiárido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. p. 17-48.

SKUJINS, J. (ed.). **Semiarid lands and deserts**: soil resources and reclamation. New York: Marcel Dekker; 1991. 678 p.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms

and controls. **Geoderma**, v. 74, p. 65-105, Nov. 1996. DOI: [10.1016/S0016-7061\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00036-5).

TARDY, Y.; BOCQUIER, G.; PAQUET, H.; MILLOT, G. Formation of clay from granitic and its distribution in relation to climate and topography. **Geoderma**. v. 10, p. 271-284, Nov, 1973. DOI: [10.1016/0016-7061\(73\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0016-7061(73)90002-5).

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 743-755, Jul./Ago. 2009. DOI: [10.1590/S0100-06832009000400001](https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001).

Estratégias para sequestro de carbono

Experimentação de modelos

Vanderlise Giongo
Mônica da Silva Santana
Alessandra Monteiro Salviano
Davi José Silva
Tony Jarbas Ferreira Cunha (in memoriam)
Maria Cléa Brito de Figueirêdo
Viviane da Silva Barros
Tatiana Ayako Taura

Introdução

Em razão do crescimento global da demanda por alimentos, está havendo uma pressão sem precedentes sobre os recursos terrestres e hídricos do nosso planeta. Contudo, o potencial de expansão das áreas de cultivo é limitado (Rosa et al., 2020). Assim, os cultivos irrigados sustentáveis se tornam uma estratégia cada vez mais importante para garantir o suprimento de alimentos num momento em que o clima está em mudança. Paralelamente, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018) destacou a necessidade de sequestrar carbono como uma estratégia para evitar o aumento na temperatura global em mais de 1,5 °C em relação aos tempos pré-industriais (Masson-Delmotte et al., 2018). Estima-se que o estoque de carbono orgânico do solo (COS) seja três vezes maior do que o estoque de carbono da atmosfera (Lal, 2018). Nesse sentido, o estoque de COS desempenha papel importante na redução das emissões de gases de efeito estufa, remoção do dióxido de carbono atmosférico, fornecimento de serviços ecossistêmicos e mitigação do clima (Bossio et al., 2020).

No Brasil, a condução da Política Nacional de Irrigação está sob a responsabilidade do Minis-

tério do Desenvolvimento Regional (MDR), que implantou o Programa Nacional de Agricultura Irrigada 2019–2029, com o objetivo de expandir e desenvolver sistemas sustentáveis de cultivos irrigados. Assim, foram estruturados cinco eixos estratégicos: eixo 1 – Incentivo à agricultura irrigada; eixo 2 – Polos de agricultura irrigada; eixo 3 – Melhoria da gestão dos projetos públicos de irrigação; eixo 4 – Implantação de unidades de referência para o desenvolvimento da agricultura irrigada; e eixo 5 – Câmara setorial de irrigação (Boletim Agricultura Irrigada, 2019). Atualmente o País possui 26 polos de irrigação e está entre os 10 maiores irrigantes do mundo. No Semiárido brasileiro, destacam-se três polos de irrigação com monocultivos diversos (Agência Nacional de Águas, 2017). O uso da irrigação em regiões secas pode aumentar a produção agrícola em até 400%, contudo o excesso de água nesses ambientes causa impactos ambientais (Fernández-Cirelli et al., 2009). O efeito combinado da água na irrigação, preparo do solo intensivo e utilização de fertilizantes sintéticos em excesso causa redução substancial de 42% do COS (Giongo et al., 2020). Ademais, promove a salinização do solo e aumenta a escassez de água (Smith et al., 2015; Carneiro et al., 2019), limitando o potencial produtivo dos cultivos.

Nesse sentido, aumentar o teor de COS, por meio de práticas conservacionistas, com a introdução de agroecossistemas multifuncionais, garante a manutenção das múltiplas funções do ecossistema terrestre. Esses sistemas são compostos por uma mistura de espécies para cobertura vegetal que, aliada a práticas de manejo adequadas, como o não revolvimento do solo, permitem um aumento significativo no estoque de COS (Giongo et al., 2020). Além disso, regulam o fluxo de gases de efeito estufa e mitigam o impacto no clima, garantindo uma produção de alimentos sustentável (Lal, 2004; Jónsson et al., 2016).

O presente capítulo apresenta resultados de estudos de dois experimentos de longa duração, que são desenvolvidos há 10 e 8 anos, em área irrigada no Semiárido brasileiro, comparando modelos de agroecossistemas multifuncionais. Neles se utilizaram a redução da intensidade do preparo do solo e o aporte de material orgânico ao solo como estratégias para sequestrar carbono em áreas irrigadas no Semiárido brasileiro, visando à sustentabilidade da produção de frutícolas e olerícolas. Também serão relatados os benefícios advindos da combinação dessas práticas.

Estoque de carbono e a sustentabilidade da produção de alimentos

As estratégias para sequestrar carbono nas áreas agrícolas irrigadas basearam-se em três premissas. A primeira é de que a mudança no uso da terra altera os ciclos de carbono e de outros elementos em escala global com significativas consequências ambientais. Diante disso, faz-se necessário reduzir drasticamente as emissões antropogênicas de carbono (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018). Nesse contexto, o solo é um importante compartimento dreno, visto que possui estoque desse elemento duas vezes superior ao da atmosfera (Lal, 2004).

A segunda premissa baseou-se no fato de a produtividade primária dos sistemas ser dependente da ciclagem de carbono, na qual, pelo processo de mineralização, são liberados nutrientes para que as plantas completem seus ciclos vegetativos e reprodutivos, destacando-se o papel da biota do solo (Janzen, 2006) nesses processos. Da interação entre organismos (plantas e fauna), emergem potencialidades do coletivo, não expressas pela soma das partes. O solo funciona como um microbioma dependente da taxa de adição e decaimento de carbono.

A última premissa, extensivamente relatada pela literatura, é de que a taxa a qual o solo armazena carbono adicional ao seu equilíbrio inicial diminui após algumas décadas e atingirá o ponto de saturação, num novo estado de equilíbrio dinâmico (Sommer; Bossio, 2014; Lal, 2018). Isso significa que o carbono orgânico não aumenta indefinidamente no solo e o tempo para que um novo estado de equilíbrio no ponto de saturação seja alcançado varia muito, dependendo do tipo de solo, clima, taxa de decaimento pré-existente, manejo do solo e das culturas e práticas conservacionistas (Lützow et al., 2006; Poeplau; Don, 2015). O tempo para essa mudança é da ordem de décadas (Sommer; Bossio, 2014; Bossio et al., 2020).

Dessa forma, desenvolver soluções locais é imprescindível para que o sucesso das medidas de mitigação às mudanças do clima e de aumento da produção de alimentos tenham impactos multiescalas (local, regional e mundial). Para trabalhar as premissas, utilizou-se como estratégia aumentar o estoque de carbono no solo, manter e/ou aumentar a produtividade dos agroecossistemas e atingir equilíbrios dinâmicos estáveis de carbono no ponto de saturação por meio de desenhos de agroecossistemas multifuncionais (Figura 1) que aumentassem a adição de carbono ao solo, a ciclagem de nutrientes, a eficiência do uso da água, e que favorecessem o sequestro de carbono no solo até atingir o ponto de saturação estável e dinâmico.



Fotos: Vanderlise Giongo

Figura 1. Modelos de agroecossistemas multifuncionais implantados no campo, em escala experimental, com o cultivo de frutícolas (A e B) e olerícolas (C e D).

Espécies de plantas de cobertura indicadas para os modelos de agroecossistemas

Os experimentos de longa duração com os cultivos de manga (*Mangifera indica*) e melão (*Cucumis melo*) começaram em 2009 e 2012, respectivamente. A área, originalmente sob mata nativa tropical seca (vegetação hiperxerófila da Caatinga), foi convertida em agricultura convencional em 1972. Durante 16 anos, foi cultivada com milho (*Zea mays* L.), feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) e melancia (*Citrullus lanatus* L.), utilizando preparo convencional do solo (CT), com revolvimento do solo. Em 1988, uma plantação de tamareiras (*Phoenix dactylifera* L.) seguiu por 20 anos. Em adição,

a área do experimento do melão permaneceu mais 2 anos sob pousio e 2 anos com cultivo de feijão-comum, previamente ao estabelecimento do estudo sobre cultivo de melão.

O presente estudo se constitui de dois sistemas de preparo do solo: sistema plantio direto (SPD) e preparo convencional (PC), combinados com três misturas de plantas de cobertura [75% leguminosas + 25% gramíneas e oleaginosas, o que se denominou de coquetel vegetal (CV1), 25% de leguminosas + 75% de gramíneas e oleaginosas (CV2) e vegetação espontânea (VE), que foi utilizada como controle].

Os tratamentos CV1 e CV2 são compostos por 14 espécies, entre elas oleaginosas, gramíneas e leguminosas, mas com diferentes proporções entre as misturas (Giongo et al., 2016; Freitas et al., 2019; Pereira Filho et al., 2019). O tratamento VE é composto principalmente por *Desmodium tortuosum* (Sw.) DC., *Macroptilium lathyroides* (L.) Urb., *Digitaria bicornis* (Lam.)

Roem. Schult., *Dactyloctenium aegyptium* (L.) Willd., *Commelina difusa* Burm. f., *Acanthospermum hispidum* DC., *Euphorbia chamaeclada* Ule, *Waltheria rotundifolia* Schrank, *Waltheria* sp. L., *Tridax procumbens* L., *Ipomoea mauritiana* Jacq., *Ipomoea bahiensis* Willd. Ex Roem. Schult. e *Amaranthus deflexus* L. (Giongo et al., 2020).

No estudo sobre o cultivo de mangueira, as misturas de plantas de cobertura são cultivadas em faixas entre as fileiras de plantio, deixando uma margem livre de 1 m de cada lado das fileiras de mangueiras. Diferentemente, no estudo sobre o cultivo de melão, as espécies são semeadas em área total, 85 a 90 dias antes da semeadura ou transplântio do melão. No SPD, as plantas de cobertura são manejadas com roçadeira manual, no florescimento total da maioria das espécies, 70 dias após a semeadura. No PC, a fitomassa aérea é incorporada com arado de disco até 20 cm de profundidade, seguido de gradagem superficial (Giongo et al., 2020) (Figura 2).

Embora a introdução de biodiversidade por meio do cultivo simultâneo de múltiplas espécies de plantas de cobertura seja uma estratégia para cultivos anuais e perenes, pode ser utilizado um menor número de espécies que as 14 introduzidas neste estudo. De modo geral, é importante incluir uma ou mais espécies de leguminosas e gramíneas. As leguminosas, em razão de sua capacidade de fixação biológica de nitrogênio e profundidade do sistema radicular, promovem a ciclagem de nutrientes, a continui-

dade de poros e adição de fitomassa à subsuperfície, favorecendo a diversidade e riqueza da fauna edáfica. A principal característica das gramíneas é a maior relação C/N, se comparadas às leguminosas, o que proporciona menor taxa de decomposição dos seus resíduos, aumentando o tempo de permanência no solo. O sistema radicular do tipo fasciculado também favorece a agregação do solo, pois libera exsudatos radiculares em menor área superficial específica. Também se destacam pela capacidade de ciclagem de nutrientes e interações micorrízicas. Recomenda-se a inclusão de uma espécie de oleaginosas, pois elas possuem sistema radicular com potencial de romper camadas compactadas e boa capacidade de ciclar nutrientes em subsuperfície – camadas mais profundas do solo. Algumas espécies, devido ao tamanho e espessura do caule, servem de base para sustentação de espécies de hábito trepadeira.

A quantidade de sementes utilizadas nos coquetéis vegetais varia com o número de espécies selecionado, além das características e qualidade da semente das espécies, conforme exemplificado na Tabela 1.

Potencial de produção de fitomassa aérea – entrada de carbono no sistema solo

Fotos: Vanderlise Giongo



Figura 2. Manejo de plantas de cobertura com roçadeira manual (A) e com grade leve (B) em agroecossistemas multifuncionais em cultivos irrigados.

Tabela 1. Recomendação de densidade de sementes para a semeadura de coquetéis vegetais, em função do número de espécies selecionadas.

| Espécie | Nome científico | Peso de 100 sementes (g) | Nº de sementes/ m linear | Número de espécies selecionadas | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| kg ha ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Oleaginosas | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Girassol | <i>Helianthus annuus</i> | 6,27 | 10 | 12,5 | 6,3 | 4,2 | 3,1 | 2,5 | 2,1 | 1,8 | 1,6 | 1,4 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 0,9 |
| Mamona | <i>Ricinus communis</i> | 69,08 | 10 | 120 | 60,0 | 40,0 | 30,0 | 24,0 | 20,0 | 17,1 | 15,0 | 13,3 | 12,0 | 10,9 | 10,0 | 9,2 | 8,6 |
| Gergelim | <i>Sesamum indicum</i> | 1 | 20 | 4 | 2,0 | 1,3 | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Gramíneas | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Milho | <i>Zea mays</i> | 30 | 10 | 60 | 30,0 | 20,0 | 15,0 | 12,0 | 10,0 | 8,6 | 7,5 | 6,7 | 6,0 | 5,5 | 5,0 | 4,6 | 4,3 |
| Milheto | <i>Pennisetum glaucum</i> | 1 | 20 | 4 | 2,0 | 1,3 | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Sorgo | <i>Sorghum bicolor</i> | 2,5 | 20 | 10 | 5,0 | 3,3 | 2,5 | 2,0 | 1,7 | 1,4 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,7 |
| Leguminosas | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Crotolária-espectábilis | <i>Crotalaria spectabilis</i> | 1,71 | 20 | 7 | 3,5 | 2,3 | 1,8 | 1,4 | 1,2 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 |
| Crotolária-júncea | <i>Crotalaria juncea</i> | 4,5 | 20 | 18 | 9,0 | 6,0 | 4,5 | 3,6 | 3,0 | 2,6 | 2,3 | 2,0 | 1,8 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1,3 |
| Feijão-de-porco | <i>Canavalia ensiformis</i> | 187 | 8 | 250 | 125,0 | 83,3 | 62,5 | 50,0 | 41,7 | 35,7 | 31,3 | 27,8 | 25,0 | 22,7 | 20,8 | 19,2 | 17,9 |
| Calopogônio | <i>Callopogonium mucunoides</i> | 1,28 | 20 | 5 | 2,5 | 1,7 | 1,3 | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Mucuna-preta | <i>Mucuna pruriens</i> | 84,45 | 8 | 135 | 67,5 | 45,0 | 33,8 | 27,0 | 22,5 | 19,3 | 16,9 | 15,0 | 13,5 | 12,3 | 11,3 | 10,4 | 9,6 |
| Guandu | <i>Cajanus cajan</i> | 8,5 | 10 | 17 | 8,5 | 5,7 | 4,3 | 3,4 | 2,8 | 2,4 | 2,1 | 1,9 | 1,7 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,2 |
| Lab-lab | <i>Lablab purpureus</i> | 20 | 20 | 80 | 40,0 | 26,7 | 20,0 | 16,0 | 13,3 | 11,4 | 10,0 | 8,9 | 8,0 | 7,3 | 6,7 | 6,2 | 5,7 |
| Mucuna-cinza | <i>Mucuna pruriens</i> | 84,45 | 8 | 135 | 67,5 | 45,0 | 33,8 | 27,0 | 22,5 | 19,3 | 16,9 | 15,0 | 13,5 | 12,3 | 11,3 | 10,4 | 9,6 |

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2005).

Os agroecossistemas multifuncionais que utilizam coquetéis vegetais, independente da proporção de espécies, adicionam aproximadamente o dobro da quantidade de fitomassa aérea ao solo, quando comparados aos agroecossistemas que utilizam como estratégia a manutenção da vegetação espontânea (Tabela 2). Em média, os coquetéis vegetais adicionam, anualmente, 7,82 t ha⁻¹ e a VE 4,15 t ha⁻¹ de fitomassa seca. No entanto, os agroecossistemas com cultivos anuais possuem a capacidade de adicionar maior quantidade de fitomassa quan-

do comparados aos perenes, com médias de 7,58 t ha⁻¹ e 3,76 t ha⁻¹ para os CVs e a VE no cultivo da mangueira, e 8,14 t ha⁻¹ e 4,55 t ha⁻¹ no cultivo do melão. Isso ocorre porque os resíduos dos cultivos anuais permanecerem na área de cultivo, enquanto os restos de poda são retirados da área para a mitigação de doenças nos pomares. Em áreas irrigadas, o manejo do solo não impacta a produção de fitomassa aérea (Tabela 2), independente do tratamento, mas altera a dinâmica de decomposição dos resí-

Tabela 2. Adição de fitomassa aérea ao solo oriunda de plantas de cobertura cultivadas na entrelinha de mangueiras e de plantas de cobertura e resíduos de melão em área total, Petrolina, PE.

| Componentes dos agroecossistemas ⁽¹⁾ | 2009 | 2010 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|---|---------------------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Biomassa aérea (Mg ha ⁻¹) | | | | | | | | | |
| Mangueira | | | | | | | | | | |
| Coquetel vegetal | | | | | | | | | | |
| CV1 | 6,52 a | 10,02 a | 8,39 a | 10,90 a | 9,55 a | 7,27 a | 5,76 a | 5,72 a | 7,31 a | 5,19 a |
| CV2 | 5,99 a | 9,89 a | 7,82 a | 9,26 a | 9,48 a | 6,97 a | 5,21 a | 6,33 a | 7,61 a | 5,61 a |
| VE | 3,12 b | 3,67 b | 3,52 b | 5,82 b | 4,42 b | 4,8 b | 2,85 b | 3,52 b | 3,22 b | 2,66 b |
| Manejo | | | | | | | | | | |
| SPD | 5,15 | 8,10 | 6,33 b | 8,98 | 7,62 | 6,35 | 4,83 | 4,83 b | 6,05 | 4,52 |
| PC | 5,26 | 7,62 | 6,82 a | 8,34 | 8,02 | 6,34 | 4,38 | 5,55 a | 6,04 | 4,46 |
| CV (%) | 18,44 | 15,7 | 8,48 | 15,79 | 18,81 | 14,7 | 18,41 | 12,75 | 19,49 | 7,89 |
| Meloeiro | | | | | | | | | | |
| Coquetel vegetal | | | | | | | | | | |
| CV1 | | | 9,71 a | 7,55 a | 8,26 a | 6,68 a | 6,92 a | 8,10 | 7,81 a | 7,07 a |
| CV2 | | | 10,24 a | 6,51 a | 7,28 a | 6,84 a | 6,14 a | 7,94 | 7,16 a | 5,79 b |
| VE | | | 5,21 b | 3,04 b | 3,24 b | 3,86 b | 4,27 b | 7,44 | 3,88 b | 2,26 c |
| Manejo | | | | | | | | | | |
| SPD | | | 8,00 | 5,73 | 5,74 b | 5,32 b | 5,64 | 7,89 | 6,55 | 5,19 |
| PC | | | 8,77 | 5,67 | 6,79 a | 6,27 a | 5,91 | 7,75 | 6,01 | 4,89 |
| CV (%) | | | 21,86 | 18,73 | 17,14 | 16,17 | 11,80 | 18,01 | 22,48 | 17,51 |

⁽¹⁾CV1: coquetel vegetal composto por 75% leguminosas + 25% gramíneas e oleaginosas; CV2: 25% leguminosas + 75% gramíneas e oleaginosas; VE: vegetação espontânea em dois sistemas de preparo do solo (SPD = sistema plantio direto; PC = preparo convencional).

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Fonte: Giongo et al. (2020).

duos e, conseqüentemente, a ciclagem de C e nutrientes nos sistemas de produção.

Além da quantidade, a qualidade da fitomassa produzida deve ser analisada. Sobre a qualidade, está consolidado na literatura que a composição química da vegetação altera a taxa de decomposição da fitomassa e o *turnover* de carbono. Porém, não há evidências de que a química da fitomassa das plantas de cobertura possa controlar o estoque de carbono no solo ao longo de décadas (Lützow et al., 2006; Giongo et al., 2020). Assim, o impacto direto sobre o estoque de carbono no solo é relacionado com a quantidade e não a qualidade da fitomassa produzida (Poeplau; Don, 2015). Nesse caso, deve-se priorizar o uso de plantas de cobertura com alto potencial de produção fitomassa, tanto aérea quanto radicular, com uma frequência de cultivo de, pelo menos, uma vez por ano ou ciclo da cultura.

Estoque de carbono no solo

A série histórica de dados de solo e planta pelo modelo matemático RothC 2.3 demonstrou o impacto da mudança do uso da terra e dos agroecossistemas nos estoques de carbono a curto, médio e longo prazos (Giongo et al., 2020). Foi observado que a mudança de uso da terra (Caatinga para cultivo agrícola) associado ao preparo convencional do solo diminuiu os estoques de carbono: de 21,3 Mg C ha⁻¹ sob Caatinga, em 1972, para 8,9 Mg C ha⁻¹ em 2009 (diminuição média de ~0,33 Mg C ha ano⁻¹). Todos os agroecossistemas propostos para o cultivo de mangueira e meloeiro que contemplam o uso de plantas de cobertura e o sistema plantio direto aumentaram os estoques de carbono.

O preparo do solo afetou negativamente os estoques de carbono, com impacto crescente seguindo a ordem dos agroecossistemas: com leguminosas > gramíneas > vegetação espontânea; o cultivo anual (melão) também proporcionou maior impacto negativo que o perene (manga) (Figura 3) (Giongo et al., 2020).

As observações ao longo do tempo e a utilização de modelo matemático preditivo do estoque de

carbono permitiram verificar parte da terceira premissa, de que a taxa de carbono adicional ao seu equilíbrio inicial diminui após algumas décadas (Sommer; Bossio, 2014; Bossio et al., 2020). Nesse sentido, também Poeplau e Don (2015) quantificaram o potencial das plantas de cobertura em aumentar o estoque de carbono no solo e concluíram que 50% do ganho ocorrem nas primeiras duas décadas. No Semiárido brasileiro, de acordo com Althoff et al. (2018) e Araújo Filho et al. (2018), seriam necessários 50 a 80 anos nas atuais condições climáticas para recuperar o estoque de carbono perdido pela mudança de uso para cultivo convencional, utilizando recomposição da vegetação nativa (Caatinga). Nos agroecossistemas multifuncionais irrigados, combinando o uso de plantas de cobertura e sistema plantio direto, podem recuperar o COS em menos da metade desse intervalo de tempo (Giongo et al., 2020). Porém estudos adicionais são necessários para verificar os mecanismos dominantes no processo de estabilização e proteção de carbono em áreas semiáridas irrigadas, definindo o ponto de saturação, num novo estado de equilíbrio dinâmico, para cada tipo de solo.

Benefícios dos agroecossistemas para a produção de alimentos, sequestro de C e mitigação dos efeitos do clima

Qualquer modelo de agroecossistemas poderá ser adotado pelos agricultores, desde que não promova perdas de produtividade, elevação dos custos de produção, resultando em menor lucratividade em relação aos modelos de produção vigentes. Assim, os agroecossistemas propostos têm, na sua multifuncionalidade, a premissa de diminuir a pressão sobre os recursos terrestres e hídricos sem conflitar a produção de alimentos e a lucratividade. Além disso, têm, no sequestro de carbono, uma estratégia para mitigar impac-

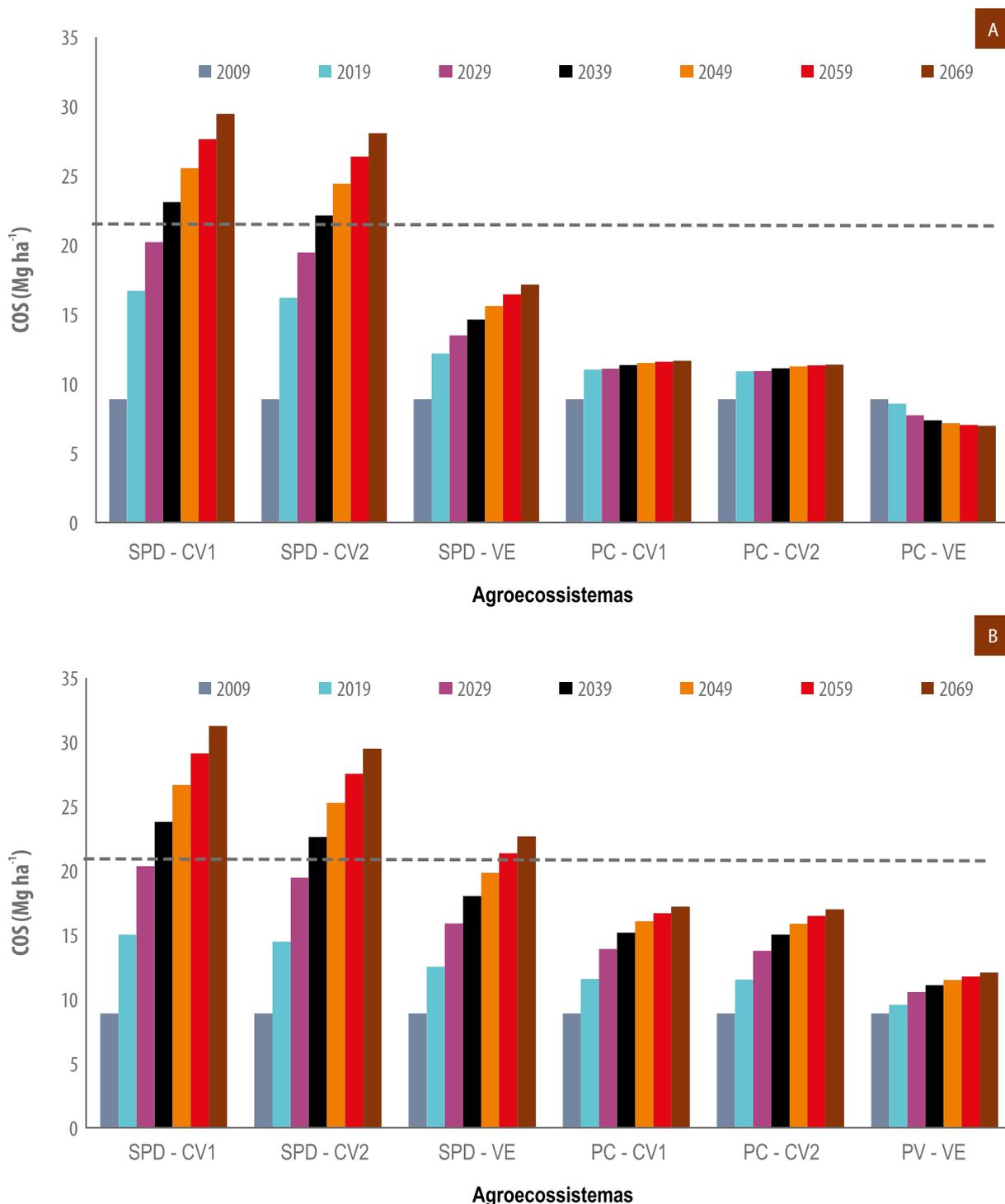


Figura 3. Carbono orgânico do solo (COS) previsto pelo modelo RothC 2.3 em seis modelos de agroecossistemas multifuncionais para o cultivo perene de mangueiras (A) e seis modelos de agroecossistemas multifuncionais para o cultivo anual do meloeiro (B).

CV1: 75% de espécies de leguminosas + 25% de gramíneas/espécies de sementes oleaginosas; CV2: 25% espécies de leguminosas + 75% de gramíneas/espécies de sementes oleaginosas; e VE: vegetação espontânea, em dois sistemas de preparo do solo (SPD = sistema plantio direto; PC = preparo convencional); linha tracejada representa Caatinga em equilíbrio dinâmico em 1972.

Fonte: Adaptado de Giongo et al. (2020).

tos ambientais, como o aumento da temperatura global e a escassez hídrica.

Diversos resultados de pesquisa desenvolvidos com esses agroecossistemas (Santos et al., 2018; Carneiro et al., 2019; Dias et al., 2020; Giongo et al., 2020) mostram que a utilização de plantas de cobertura associado ao sistema plantio direto podem proporcionar boas produtividades (Tabela 3) e lucratividade (Tabela 4) dos cultivos, mitigando alguns indicadores de impacto

ambiental, relacionadas, por exemplo, às pegadas de carbono e hídricas (Tabela 5).

Os modelos de agroecossistemas para cultivo de mangueira que incluíam o cultivo de coquetéis vegetais promoveram aumento da produtividade independente do tipo de manejo do solo utilizado. Apesar de as produtividades alcançadas na produção de manga serem pouco competitivas, quando comparadas com as de escala comercial, destaca-se que a cultivar Kent apresenta particu-

Tabela 3. Produtividade de mangueira e meloeiro em diferentes modelos de agroecossistemas, contemplando coquetéis vegetais e plantas espontâneas, como plantas de cobertura e dois sistemas de manejo de solo, Petrolina, PE.

| Componentes dos agroecossistemas ⁽¹⁾ | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|---|------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | (Mg ha ⁻¹) | | | | | | | |
| Mangueira | | | | | | | | |
| Coquetel vegetal | | | | | | | | |
| CV1 | | | 8,38 a | | 10,63 a | 30,69 a | 14,42 | 25,65 a |
| CV2 | | | 8,15 a | | 7,98 ab | 30,07 a | 13,52 | 26,32 a |
| VE | | | 6,05 b | | 6,42 b | 19,16 b | 10,61 | 17,87 b |
| Manejo | | | | | | | | |
| SPD | | | 7,80a | | 7,07 b | 26,25a | 12,03a | 21,45 b |
| PC | | | 7,25a | | 9,61 a | 27,03a | 13,67a | 25,11 a |
| CV (%) | | | 16,55 | | 31,27 | 14,58 | 30,78 | 13,59 |
| Meloeiro | | | | | | | | |
| Coquetel vegetal | | | | | | | | |
| CV1 | 25,75a | 44,89a | 36,07a | 35,02a | 52,73a | 31,64a | 49,06a | 44,10a |
| CV2 | 24,81a | 47,45a | 34,00a | 36,64a | 55,28a | 33,17a | 48,13a | 45,83a |
| VE | 25,97 | 40,89 | 29,93 | 33,03 | 58,27 | 34,96 | 44,67 | 47,78 |
| Manejo | | | | | | | | |
| SPD | 24,07 | 40,19 b | 31,05 | 38,21 a | 53,35 | 32,01 | 48,39 | 48,40 |
| PC | 26,95 | 48,63 a | 35,62 | 31,59 b | 57,50 | 34,50 | 46,18 | 43,41 |
| CV (%) | 18,26 | 17,51 | 19,77 | 14,6 | 14,31 | 14,3 | 11,9 | 20,74 |

⁽¹⁾CV1: coquetel vegetal composto por 75% leguminosas + 25% gramíneas e oleaginosas; CV2: 25% leguminosas + 75% gramíneas e oleaginosas; VE: vegetação espontânea em dois sistemas de preparo do solo (SPD = sistema plantio direto; PC = preparo convencional).

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Fonte: Vanderlise Giongo (dados não publicados).

Tabela 4. Custo de produção dos modelos de agroecossistemas de mangueira e meloeiro que utilizam sistema plantio direto e plantas de cobertura (SPD-CV) e sistemas convencional e vegetação espontânea (PC-VE), Petrolina, PE.

| Especificação | SPD-CV | PC-VE |
|-----------------------------------|------------|------------|
| Mangueira | | |
| Custo total (US\$/ha) | 134.421,00 | 98.898,53 |
| Receita total (US\$/ha) | 338.715,90 | 240.459,20 |
| Lucro (Receita - Custo) (US\$/ha) | 204.294,79 | 141.560,67 |
| Meloeiro | | |
| Custo total (US\$/ha) | 5.894,72 | 5.617,48 |
| Receita total (US\$/ha) | 25.126,46 | 20.668,47 |
| Lucro (Receita - Custo) (US\$/ha) | 19.231,75 | 15.050,99 |

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2018) e Dias et al. (2020).

laridades de manejo fitotécnico que precisam ser ajustados. Já para o cultivo de meloeiro, a produtividade aumentou ao longo de 8 anos, independentemente do tipo de cobertura e de manejo do solo, sendo superior as médias regional e nacional, em torno de 25 Mg ha⁻¹ (Tabela 3). Porém, também no melão, observa-se a tendência de que, em alguns anos, os coquetéis vegetais aumentem a produtividade principalmente quando associado ao plantio direto.

A análise econômica realizada pela equipe do projeto mostrou que os agroecossistemas em sistema plantio direto e plantas de cobertura geraram receitas e lucros maiores (44%) que o sistema convencional de manejo (Tabela 4), tanto na mangueira quanto no meloeiro (Santos et al., 2018; Carneiro et al., 2019; Dias et al., 2020). O preparo convencional apresenta custos de manutenção elevados relacionados à mecanização (subsolagem e gradagem) e à fertilização, mas não tem o custo de implantação dos coquetéis vegetais (Tabela 4). Ainda assim, os resultados demonstram que os custos relacionados à aquisição de sementes de plantas de cobertura são compensados pelos maiores rendimentos da cultura, e, a longo prazo, pela diminuição dos custos da aquisição de adubos, principalmente os nitrogenados. No último ciclo de cultivo do melão, a quantidade de adu-

bos nitrogenados, fosfatados e potássicos foi reduzida em 40%, 15% e 50 %, respectivamente, sem redução significativa na produtividade. Mais estudos estão sendo conduzidos de forma a permitir que as recomendações de adubação sejam realizadas em função do balanço de nutrientes no sistema, considerando as entradas pelas plantas de cobertura, a quantidade exportada pelas culturas e o estoque disponível no solo. Isso permitirá aumentar a eficiência de uso dos fertilizantes, reduzindo os riscos de salinização, de contaminação do solo e dos mananciais, a emissão de gases de efeito estufa, bem como os custos de produção.

Vale ressaltar que, nos anos 2017 e 2019, detectou-se a presença de nematoides nas áreas e mesmo assim as plantas apresentaram bom desempenho produtivo, provavelmente devido ao aumento da qualidade do solo, principalmente da matéria orgânica e da diversidade biológica.

Os agroecossistemas propostos apresentam potencial para reverter totalmente ou parcialmente o impacto da mudança do uso da terra, como o desmatamento na Caatinga e a instalação de sistemas de produção baseados em monocultivos. Entre os benefícios correlatos, comprovou-se diminuição da pegada de carbono, pois sequestra o carbono no solo; da pega-

Tabela 5. Impactos ambientais de produção dos modelos de agroecossistemas de mangueira e meloeiro no sistema plantio direto e plantas de cobertura (SPD-CV) e sistema convencional e vegetação espontânea (PC-VE), Petrolina, PE.

| Categoria de impacto | Unidade ⁽¹⁾ | SPD-CV | PC-VE |
|-------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Mangueira | | | |
| Pegada de carbono | | | |
| Mudança climática | kg CO ₂ eq | -1,30 x 10 ⁻¹ | -2,51 x 10 ⁻¹ |
| Pegada hídrica | | | |
| Eutrofização em água doce | kg P eq | 2,33 x 10 ⁻⁵ | 1,03 x 10 ⁻⁵ |
| Eutrofização marinha | kg N eq | 1,41 x 10 ⁻³ | -1,84 x 10 ⁻³ |
| Depleção de água | m ³ | 1,13 x 10 ⁻¹ | 7,44 x 10 ⁻¹ |
| Toxicidade humana, câncer | CTUh | 8,33x 10 ⁻⁹ | 1,97 x 10 ⁻⁸ |
| Toxicidade humana, não câncer | CTUh | 7,25 x 10 ⁻⁸ | 2,76 x 10 ⁻⁸ |
| Ecotoxicidade em água doce | CTUe | 1,09 | 6,41 x 10 ⁻¹ |
| Meloeiro | | | |
| Pegada de carbono | | | |
| Mudança climática | kg CO ₂ eq | 515,09 | 754,11 |
| Pegada hídrica | | | |
| Eutrofização em água doce | kg P eq | 0.059 | 0.069 |
| Eutrofização marinha | kg N eq | -0.136 | 0.895 |
| Depleção de água | m ³ | 156,49 | 268,91 |
| Toxicidade humana, câncer | CTUh | 2,04 x 10 ⁻⁵ | 2,50 x 10 ⁻⁵ |
| Toxicidade humana, não câncer | CTUh | 7,79 x 10 ⁻⁵ | 3,34 x 10 ⁻⁴ |
| Ecotoxicidade em água doce | CTUe | 2.127,72 | 5.144,99 |

⁽¹⁾CTUh: unidade tóxica comparativa para humanos; CTUe: unidade tóxica comparativa de ecotoxicidade.

Fonte: Santos et al. (2018), Carneiro et al. (2019) e Dias et al. (2020).

da hídrica, porque aumenta a eficiência de uso d'água; e do impacto ambiental, uma vez que reduz os processos de lixiviação e adiciona nitrogênio atmosférico por meio da fixação biológica (Tabela 5).

A maior produtividade de água, ou seja, menor quantidade de água utilizada por tonelada produzida, e a menor pegada de carbono, um índice que mede o impacto das atividades do homem sobre a natureza, a partir da quantidade de dióxido de carbono (CO₂) que elas emi-

tem, permitem considerar os agroecossistemas como mais sustentáveis. Sendo assim, considerados importantes na redução das emissões de gases de efeito estufa e em cenários de redução da disponibilidade hídrica (Santos et al., 2018; Carneiro et al., 2019; Dias et al., 2020).

Os agroecossistemas multifuncionais promovem maior retenção de carbono, água e nutrientes no solo, melhorando as condições ambientais para a fauna edáfica (Freitas, 2018; Pereira Filho et al., 2019). Os agroecossistemas irriga-

dos que utilizam sistema plantio direto e plantas de cobertura (SPD-CV) aumentam a abundância de organismos que vivem no solo em relação aos monocultivos irrigados e superam também a Caatinga, que se encontra em equilíbrio dinâmico (Tabela 6). Em sistema irrigado, com maior oferta de água e alimento, o número de ordens de organismos vivos (riqueza) também tende a aumentar (Tabela 6). Contudo, quando se analisa o índice de diversidade de Shannon, que considera simultaneamente a abundância e riqueza de organismos, observa-se que a biodiversidade encontrada em agroecossistemas se assemelha a da mata nativa (Tabela 6). Isso ocorre devido à presença de ordens raras (exemplo: *Scorpionidea* e *Pseudoscorpiones*), encontradas principalmente em ambientes não perturbados, como a Caatinga.

Os agroecossistemas, por serem compostos por diferentes grupos funcionais de plantas (leguminosas, gramíneas e oleaginosas), apresentam maior dominância dos organismos edáficos (índice de Simpson, Tabela 6). Enquanto a mata nativa (Caatinga), por estar em equilíbrio e estabilidade ambiental, apresenta equidade superior ao monocultivo irrigado e aos agroecossistemas (índice de Pielou, Tabela 6). O índice de Simpson é utilizado em análises quantitativas de comunidades biológicas e fornece a ideia da probabilidade de se coletar aleatoriamente dois indivíduos da comunidade e, obrigatoriamente, pertencerem a espécies diferentes. Já o índice de Equabilidade de Pielou permite representar a uniformidade da distribuição dos indivíduos entre as espécies existentes. O uso de maior diversidade de plantas aliada a retenção de carbono no solo aumentou a abundância das ordens edáficas: Hymenoptera, Collembola,

Diptera, Coleoptera e Acari nos agroecossistemas multifuncionais irrigados (Figura 4).

O aumento da produtividade primária líquida nos agroecossistemas irrigados em região semiárida permite melhores condições para promover a biodiversidade da fauna do solo. A fauna edáfica, por sua vez, contribui para a decomposição de resíduos, sequestro de carbono, formação de macro e microagregados, melhorando assim aeração e distribuição de nutrientes no perfil do solo, compondo um círculo virtuoso de mitigação às mudanças do clima e aumento da produção de alimentos.

Considerações finais

Os agroecossistemas multifuncionais, contemplando misturas de plantas, plantio direto, cultivos perenes e anuais, são capazes de aumentar os estoques de carbono no solo em sistemas irrigados de produção, auxiliando na mitigação das mudanças climáticas em escala regional no Semiárido brasileiro. Além disso, o processo de mineralização dos resíduos de fitomassa aportados pelos agroecossistemas disponibiliza nutrientes essenciais para os ciclos vegetativos e reprodutivos das culturas, como meloeiro e mangueira, suportando produtividades competitivas. Vale salientar que o aumento da produtividade não é conflitante com o aumento do estoque de carbono, ocorrendo simultaneamente, já que o solo funciona como um microbioma dependente da taxa de adição e decaimento de carbono, em equilíbrio dinâmico.

Outra vantagem dos agroecossistemas que utilizam simultaneamente o cultivo de plantas de cobertura e os princípios do sistema plantio dire-

Tabela 6. Índices de biodiversidade em agroecossistema multifuncional do meloeiro, em sistema plantio direto e plantas de cobertura (SPD-CV), em Caatinga e monocultivo irrigado, em área de produtor, Petrolina, PE.

| Cultivo | Abundância | Riqueza | Shannon | Simpson | Pielou |
|----------------------|------------|---------|---------|---------|--------|
| SPD- CV | 235 | 16 | 1,41 | 0,69 | 0,51 |
| Caatinga | 23 | 10 | 1,43 | 0,66 | 0,62 |
| Monocultivo irrigado | 63 | 7 | 0,82 | 0,41 | 0,42 |

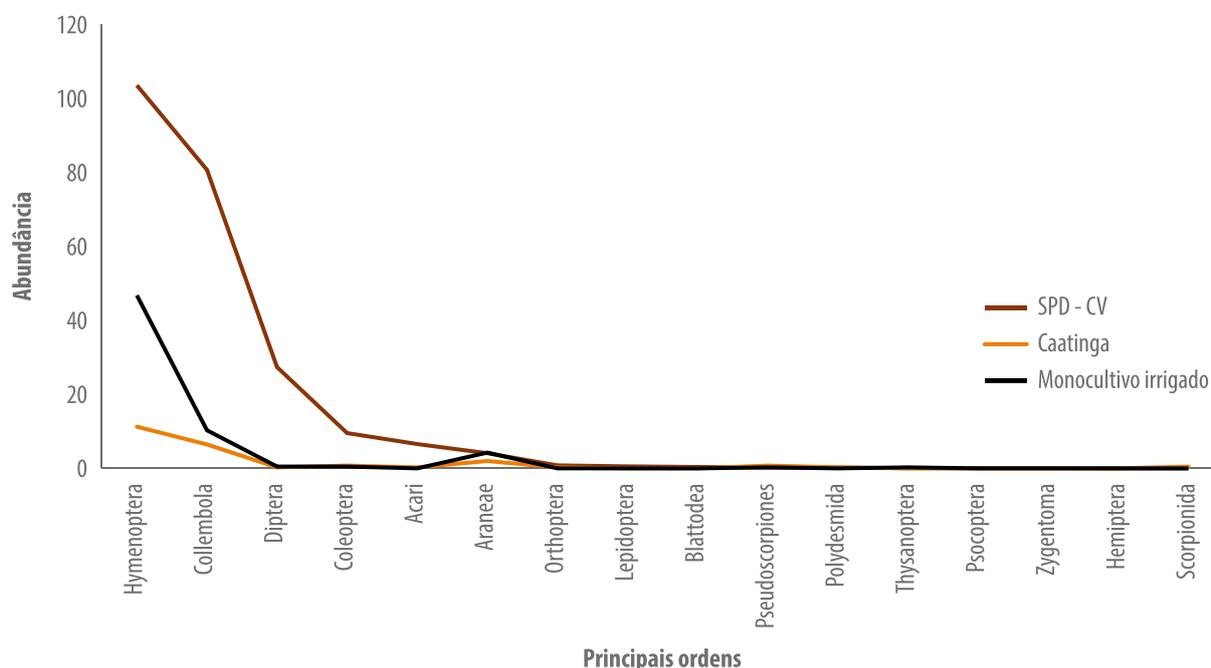


Figura 4. Abundância das ordens encontradas em três diferentes usos na terra no Semiárido brasileiro.

SPD-CV: sistema plantio direto e plantas de cobertura.

to, comprovada por modelos matemáticos preditivos, é o armazenamento de carbono adicional ao seu equilíbrio inicial numa taxa decrescente ao longo do tempo. Valores similares aos encontrados na vegetação remanescente serão alcançados dentro da segunda e terceira décadas. Também foi observado que a recuperação desse equilíbrio foi bastante rápida, quando comparado ao tempo necessário para recuperar a Caatinga degradada por meio da vegetação remanescente, o que levaria 5 a 8 décadas.

Quanto aos impactos econômicos e ambientais, foi possível observar que os modelos de agroecossistemas geram receitas e lucros maiores em relação ao sistema convencional, e reduções nas pegadas de carbono e hídrica. E, finalmente, o impacto positivo dos modelos dos agroecossistemas sobre a fauna edáfica do solo colabora com a comprovação da multifuncionalidade dessa proposta de produzir alimentos, aumentar a diversidade biológica e sequestrar carbono no solo no Semiárido brasileiro.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas irrigação:** uso da água na agricultura irrigada. Brasília, DF, 2017. 86 p.

ALTHOFF, T. D.; MENEZES, R. S. C.; PINTO, A. S.; PAREYN, F. G. C.; CARVALHO, A. L.; MARTINS, J. C. R.; CARVALHO, E. X.; SILVA, A. S. A.; DUTRA, E. D.; SAMPAIO, E. V. S. B. Adaptation of the century model to simulate C and N dynamics of Caatinga dry forest before and after deforestation. **Agriculture Ecosystems Environment**, v. 254, p. 26-34, Feb. 2018. DOI: [10.1016/j.agee.2017.11.016](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.016).

ARAÚJO FILHO, R. N.; FREIRE, M. B. G. S.; WILCOX, B. P.; WEST, J. B.; FREIRE, F. J.; MARQUES, F. A. Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management**, v. 407, p. 210-220, Jan. 2018. DOI: [10.1016/j.foreco.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.002).

BOLETIM AGRICULTURA IRRIGADA. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, v. 1, set. 2019. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSDRU/ArquivosPDF/Boletim_Agricultura-Irrigada_Primeira-Edio_-_Setembro-de-2019.pdf. Acesso em: 24 ago. 2020.

BOSSIO, D. A.; ELLIS, P. W.; FARGIONE, J.; SANDERMAN, J.; SMITH, P.; WOOD, S.; ZOMER, R. J.; UNGER, M. von; EMMER, I. M.; GRISCOM, B. W. The role of soil carbon in natural climate solutions. **Nature Sustainability**, v. 3, p. 391-398, 2020. DOI: [10.1038/s41893-020-0491-z](https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z).

CARNEIRO, J. M. DIAS, A. F.; BARROS, S.; GIONGO, V.; MATSUURA, M. I. S. F.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. Carbon and water footprints of Brazilian mango produced in the

- semiarid region. The **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, p. 735-752, 2019. DOI: [10.1007/s11367-018-1527-8](https://doi.org/10.1007/s11367-018-1527-8).
- DIAS, A. F.; GIONGO, V.; BARROS, V. S.; CARNEIRO, J. M.; FIGUEIRÉDO, M. C. B. An agile approach for evaluating the environmental-economic performance of cropping systems at experimental stage: the case of Brazilian mango. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 1588-1604, June 2020. DOI: [10.1007/s11367-020-01772-2](https://doi.org/10.1007/s11367-020-01772-2).
- FERNÁNDEZ-CIRELLI, A.; ARUMÍ, J. L.; RIVERA, D.; BOOCHS, P. W. Environmental effects of irrigation in arid and semi-arid regions. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 69, (SUPPL. 1), p. 27-40, 2009.
- FREITAS, M. S. C. **Distribuição da fauna epigeica, ciclagem de nutrientes e carbono do solo em um agroecossistema de mangueira no Semiárido**. 2018. 115 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, Areia.
- FREITAS, M. S. C.; SOUTO, J. S.; GONÇALVES, M.; ALMEIDA, L. E. S.; SALVIANO, A. M.; GIONGO, V. Decomposition and Nutrient Release of Cover Crops in Mango Cultivation in Brazilian Semi-Arid Region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, p. 1-21, Apr. 2019. DOI: [10.1590/18069657rbcs20170402](https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170402).
- GIONGO, V.; COLEMAN, K.; SANTANA, M. S.; SALVIANO, A. M.; OLSZVESKI, N.; SILVA, D. J.; CUNHA, T. J. F.; PARENTE, A.; WHITMORE, A. P.; RICHTER, G. M. Optimizing multifunctional agroecosystems in irrigated dryland agriculture to restore soil carbon – Experiments and modelling. **Scienc of the Total Environment**, v. 725, July 2020. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.138072](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138072).
- GIONGO, V.; SALVIANO, A. M.; SANTANA, M. S.; COSTA, N. D.; YURI, J. E. Soil management systems for sustainable melon cropping in the submedian of the São Francisco Valley. **Revista Caatinga**, v. 29, p. 537-547, July/Sept. 2016. DOI: [10.1590/1983-21252016v29n303rc](https://doi.org/10.1590/1983-21252016v29n303rc).
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Global Warming of 1.5°C**. 2018. Special Report. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15>. Acesso em: 24 ago. 2020
- JANZEN, H. H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, p. 419-424, Mar. 2006. DOI: [10.1016/j.soilbio.2005.10.008](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.10.008).
- JÓNSSON, J. Ö. G.; DAVÍÐSDÓTTIR, B.; JÓNSDÓTTIR, E. M.; KRISTINSDÓTTIR, S. M.; RAGNARSDÓTTIR, K. V. Soil indicators for sustainable development: a transdisciplinary approach for indicator development using expert stakeholders. **Agriculture Ecosystems Environment**, v. 232, p. 179-189, Sept. 2016. DOI: [10.1016/j.agee.2016.08.009](https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.009).
- LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. **Science**, v. 304, p. 1623-1627, June 2004. DOI: [10.1126/science.1097396](https://doi.org/10.1126/science.1097396).
- LÜTZOW, M. V.; KÖGEL-KNABNER, I.; EKSCHMITT, K.; MATZNER, E.; GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B.; FLESSA, H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. **European Journal Soil Science**, v. 57, p. 426-445, May 2006. DOI: [10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x).
- MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P. R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J. B.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M. I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. Summary for policymakers. Global Warming of 1.5°C. In: AN IPCC SPECIAL Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to IPCC – Sr15, 2018. [S.l.]: IPCC, 2018.
- PEREIRA FILHO, A.; TEIXEIRA FILHO, J.; SALVIANO, A. M.; YURI, J. E.; GIONGO, V. Nutrient cycling in multifunctional agroecosystems with the use of plant cocktail as cover crop and green manure in the semi-arid. **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, p. 241-251, Jan. 2019. DOI: [10.5897/AJAR2018.13600](https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13600).
- POEPLAU, C.; DON, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops - a meta-analysis. **Agriculture Ecosystems Environment**, v. 200, p. 33-41, Feb. 2015. DOI: [10.1016/j.agee.2014.10.024](https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024).
- ROSA, L.; CHIARELLI, D. D.; RULLI, M. C.; ANGELO, J. D.; ODORICO, P. D. Global agricultural economic water scarcity. **Science Advances**, v. 6, n. 18, p. 1-10, Apr. 2020. DOI: [10.1126/sciadv.aaz6031](https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz6031).
- SANTOS, T. L.; NUNES, A. B. A.; GIONGO, V.; BARROS, V. S.; FIGUEIRÉDO, M. C. B. Cleaner fruit production with green manure: The case of Brazilian melons. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 260-270, Apr. 2018. DOI: [10.1016/j.jclepro.2017.12.266](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.266).
- SILVA, M. S. L.; GOMES, T. C. A.; MACHADO, J. C.; SILVA, J. A. M.; CARVALHO, N. C. S.; SOARES, E. M. B. **Produção de fitomassa de espécies vegetais para adubação verde no Submédio São Francisco**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2005. (Embrapa Semi-Árido. Instruções técnicas, 71).
- SMITH, P.; COTRUFO, M. F.; RUMPEL, C.; PAUSTIAN, K.; KUIKMAN, P. J.; ELLIOTT, J. A.; MCDOWELL, R.; GRIFFITHS, R. I.; ASAKAWA, S.; BUSTAMANTE, M.; HOUSE, J. I.; SOBOCKÁ, J.; HARPER, R.; PAN, G.; WEST, P. C.; GERBER, J. S.; CLARK, J. M.; ADHYA, T.; SCHOLLES, R. J.; SCHOLLES, M. C. Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. **SOIL**, v. 1, n. 2, p. 665-685, 2015. DOI: [10.5194/soil-1-665-2015](https://doi.org/10.5194/soil-1-665-2015).
- SOMMER, R.; BOSSIO, D. Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. **Journal of Environmental Management**, v. 144, p. 83-87, Nov. 2014. DOI: [10.1016/j.jenvman.2014.05.017](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.017).

Fundamentos para o desenho de agroecossistemas multifuncionais adaptados às condições de semiaridez

Vanderlise Giongo
Alessandra Monteiro Salviano
Mônica da Silva Santana
Maria do Socorro Conceição de Freitas
Tatiana Ayako Taura

Introdução

Serviços de provisionamento, como a produção de alimentos e fibra, sempre foram o foco principal da agricultura. Ao longo da história humana, os sistemas agrícolas apresentaram algum tipo de *trade-off* entre produtividade e capacidade de suporte ambiental. Desde os anos 1950, os sistemas intensivos com base no cultivo de uma única cultura ou de uma única cultivar, em rotações simplificadas ou monoculturas, com o uso intensivo de insumos e agroquímicos, têm sido preferidos aos mais diversificados, por diferentes razões, independentemente das consequências ambientais. Com isso, os *trade-offs* dos atuais sistemas agrícolas estão diminuindo a biodiversidade e excedendo os limites dos ciclos biogeoquímicos, provocando taxa de extinção sem precedentes de espécies silvestres e levando os ecossistemas globais à beira do colapso (Gaba et al., 2015; Funabashi, 2018).

A redução drástica da diversidade de plantas cultivadas tornou a produção mundial de alimentos mais vulnerável e altamente dependente de insumos externos, devido aos riscos associados à uniformidade genética das culturas. A homogeneidade ecológica na agricultura está intimamente ligada à presença de insetos-praga, doenças e plantas invasoras (Altieri; Nicholls, 2004; Nicholls; Altieri, 2017). Muitos es-

forços, estudos e recursos foram concentrados no tema mudanças climáticas, relacionando o sequestro de carbono e a mitigação de emissão de gases de efeitos estufa aos ecossistemas e agroecossistemas, mas poucos relacionam a eficiência do ambiente em sequestrar carbono e preservar a biodiversidade, ou encontrar na biodiversidade a resiliência ou segurança alimentar.

A agricultura e os sistemas atuais de produção de alimentos necessitam de mudanças por causa do crescimento populacional, das mudanças climáticas e da degradação do ambiente. Concomitantemente, o crescimento econômico desigual, as transformações sociais e econômicas e outros fatores estão moldando os sistemas alimentares e as dietas. Como resultado, a prevalência de sobrepeso, obesidade e doenças não transmissíveis relacionadas à alimentação está aumentando, ao mesmo tempo em que persistem os problemas relativos à fome, como a deficiências de macronutrientes e micronutrientes, e consequentemente a desnutrição.

Entre os desafios da agricultura, destaca-se a produção de alimentos, fibras e energia em bases sustentáveis, garantindo a segurança alimentar para uma população crescente e diante das mudanças climáticas, sem perder os recursos genéticos de forma irremediável, preservando o ambiente. Segundo Tilman e Clark (2014),

o trilema dieta-saúde-ambiente é um desafio global, de grande importância para a saúde pública e ambiental, que a humanidade atravessa diante dos cenários de mudanças climáticas.

A agricultura nunca esteve tão próxima da ecologia na proposição de soluções estratégicas aos desafios globais. A proposição de agroecossistemas multifuncionais compõe uma das estratégias e baseia-se em leis, fundamentos, teorias, conceitos, preceitos da ecologia e estudos relacionados ao desenvolvimento da agricultura, valorando a biodiversidade para que surjam propriedades emergentes que favoreçam o homem e a natureza.

A tarefa posta e que será discutida no presente capítulo é o desenho de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis, adequados aos modelos de dietas alternativas que oferecem benefício à saúde, que sejam amplamente adotados, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa, o desmatamento, a extinção de espécies e as doenças crônicas não transmissíveis.

Biodiversidade e riqueza de espécies: soluções ecológicas

Grande parte do foco da biodiversidade dentro das paisagens agrícolas tem sido a conservação de espécies raras. Mas, com o tempo, outras questões tornaram-se igualmente importantes, como o aumento da biodiversidade ou riqueza de espécies para melhorar as funções do ecossistema, destacando-se a produtividade primária, o balanço de nutrientes e outros serviços ecossistêmicos, como polinização e controle biológico (Weibull et al., 2003). Nesse contexto, a biodiversidade não está somente ligada às questões de preservação do ambiente, mas também à economia e à produtividade dos agroecossistemas.

Para medir biodiversidade, é necessário entender os seus conceitos e variáveis. Biodiversidade é o número de taxa (reinos, filos, classes,

ordens, famílias, gêneros, espécies ou organismos) por área. Também, é uma medida da variedade que leva em consideração a riqueza (número de espécies) e a abundância relativa (número de indivíduos em cada espécie) (Ricklefs, 2003). A riqueza de espécies é um dos aspectos mais importantes da biodiversidade, em parte por causa de sua natureza fundamental, mas, principalmente, porque há mais dados disponíveis para essa variável do que qualquer outro aspecto da biodiversidade (Begon et al., 2006). Os autores citam parte de uma pesquisa internacional que utilizou protocolos em oito campos europeus, para investigar o efeito da riqueza de espécies sobre a produtividade primária (medida como acumulação de biomassa acima do solo) por comunidades de pastagens, com diferentes números de espécies de gramíneas, leguminosas e outras herbáceas. Embora os resultados detalhados apresentem diferença entre os sítios, houve redução global da produtividade média de biomassa em função da perda de espécies (Figura 1A). Para uma dada riqueza de espécies, houve também declínio na produtividade com redução no número de grupos funcionais (gramíneas, leguminosas, herbáceas) (Figura 1B).

Cardinale et al. (2012) destacam seis evidências gerais do impacto da biodiversidade sobre os ecossistemas, as quais servem de parâmetro para a composição de espécies de plantas e dos táxons que serão favorecidos nos desenhos de agroecossistemas:

- A perda da biodiversidade reduz a capacidade de o ecossistema captar energia luminosa e transformá-la em energia química (produção primária), decompor resíduos e ciclar nutrientes.
- A redução da biodiversidade diminui a estabilidade das funções ecossistêmicas ao longo do tempo.
- O impacto da biodiversidade sobre um único ecossistema não é linear e tende à saturação, ou seja, pequenas perdas de biodiversidade têm impactos relativamente pequenos sobre o funcionamento do ecossistema, mas

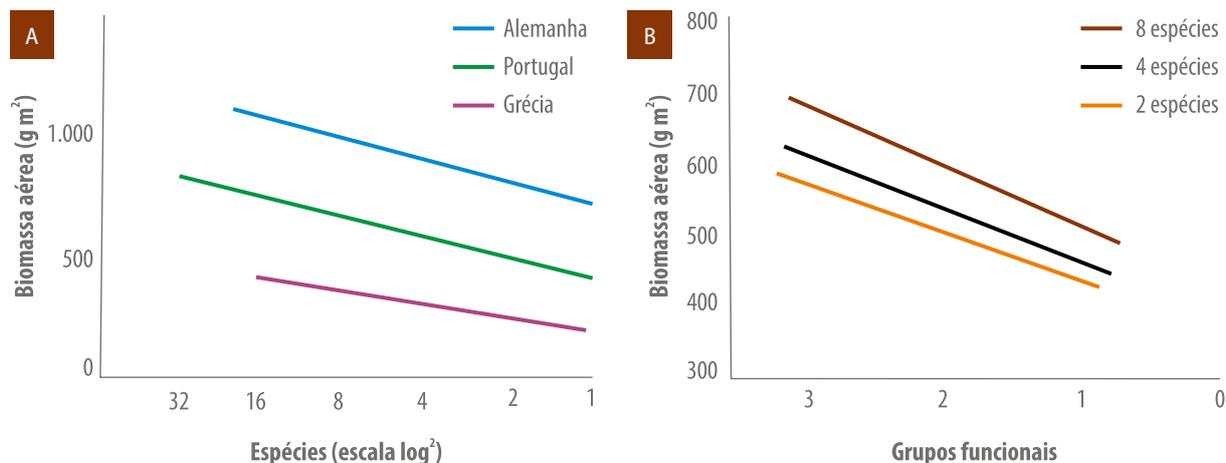


Figura 1. Decréscimo da riqueza de espécies (A) e de grupos funcionais (B) em função da biomassa aérea em pastagens simuladas na Europa.

Fonte: Adaptado de Begon et al. (2006).

as perdas crescentes levam à alteração significativa nas suas funções.

- Espécies-chave que exercem forte influência sobre a produtividade proporcionam comunidades mais produtivas, e o aumento da diversidade funcional dos organismos aumenta o uso de recursos naturais disponíveis.
- A perda de diversidade ao longo dos níveis tróficos influencia mais fortemente as funções ecossistêmicas do que os próprios níveis tróficos.
- As características funcionais dos organismos impactam a magnitude do funcionamento do ecossistema. Sendo assim, a perda de biodiversidade gera extinção de algumas funções ecossistêmicas.

O impacto da biodiversidade em agroecossistemas também pode ser observado no estudo de 12 anos de duração feito por Mueller et al. (2013). Os autores utilizaram cinco níveis diferentes de riqueza de espécies de plantas (1, 2, 4, 8 e 16 espécies), em parcelas de 9 m x 9 m. A composição de espécies de cada parcela foi determinada por sorteios aleatórios de um grupo de 18 espécies de plantas que incluiu: quatro espécies de forragens dicotiledôneas e herbáceas (não leguminosas), quatro leguminosas não lenhosas, quatro gramíneas C3, quatro gramíneas C4 e duas espécies de *Quercus*. Assim,

todas as parcelas continham pelo menos duas espécies de cada um dos tipos de plantas herbáceas. A proporção observada de biomassa de raízes profundas aumentou mais do que o esperado com a riqueza de espécies e foi positivamente correlacionada com a produtividade acima do solo. A proporção de biomassa de raízes profundas explicou a variação na produtividade, mesmo após considerar a presença/abundância de leguminosas e maior disponibilidade de nitrogênio. Diversas parcelas tiveram distribuições de profundidade de raízes que foram duas vezes mais profundas do que o esperado a partir de sua composição de espécies e correspondentes características de monocultura, em parte devido a interações entre gramíneas C4 e leguminosas. Esses resultados sugerem que a produtividade de diversas comunidades de plantas foi parcialmente dependente de interações de plantas que causaram raízes distribuídas mais profundamente no solo.

Outro exemplo do impacto de biodiversidade em agroecossistemas é o estudo de Florence e colaboradores (Florence et al., 2019), no qual foi utilizada uma mistura de seis grupos funcionais pré-definidos, cada um com três espécies de plantas de cobertura. Cada espécie foi semeada em monocultura, e o tratamento mais diverso continha todas as 18 espécies. Os autores testaram simultaneamente as hipóteses diversida-

de-productividade, diversidade-invasibilidade e diversidade-estabilidade, que propõem que o aumento da diversidade de espécies deve levar, respectivamente, ao incremento da produtividade média da biomassa, à maior resistência à invasão e à estabilidade. Os resultados do estudo evidenciaram que o acréscimo da diversidade da mistura de culturas de cobertura promoveu adição e estabilidade de biomassa média acima do solo e aumento da supressão de plantas espontâneas. Porém, os autores destacam que a supressão da vegetação espontânea pode ser um efeito da maior produção de biomassa e não da diversidade de plantas de cobertura.

É importante destacar que há estudos sobre o impacto da biodiversidade em ecossistemas e agroecossistemas em terras secas devido ao frágil equilíbrio edafoclimático e biótico, o que condiciona produções primárias menores do que as comparadas aos trópicos úmidos e quentes. Nesse sentido, o estudo de Srivastava e Singh (2005) compara a composição, densidade e diversidade de espécies entre agroecossistemas de arroz (*Oryza sativa*) de sequeiro e irrigado e de pastagem em trópicos secos. No cultivo de arroz em terras secas, faz-se baixo consumo de fertilizantes, e as plantas são cultivadas por semeadura; já no irrigado, utilizam-se altas adições de fertilizantes, faz-se o manejo da irrigação e o cultivo é feito por meio de transplântio de mudas. Enquanto na pastagem, o consumo de forragem ocorre após a estação chuvosa por meio do pastoreio. Todos os ecossistemas apresentaram número comparável de espécies no inverno (12–14), mas, na época das chuvas, maior número de espécies foi registrado na pastagem (21). A composição de espécies da pastagem foi completamente diferente de ambos os agroecossistemas (semelhança <1%). Os sistemas de cultivo de arroz de sequeiro e irrigado apresentaram apenas 25% e 38% de similaridade entre si durante as estações de inverno e chuvosa, respectivamente. Maior diversidade de espécies ocorreu no pasto em relação aos dois agroecossistemas que cultivavam arroz. As tendências sazonais de diversidade de

espécies e uniformidade de espécies foram semelhantes em ambos os agroecossistemas, mas o irrigado exibiu diversidade de espécies relativamente maior. As mudanças na composição e diversidade de espécies em agroecossistemas são atribuídas principalmente a diferenças no manejo da água. A irrigação nesse estudo reduziu a diversidade de ervas daninhas, mas levou à dominância de algumas potencialmente nocivas, como a *Phalaris minor*.

Para apresentar soluções ecológicas para a segurança alimentar global, Isbell et al. (2017) discutem os benefícios de aumento da diversidade de plantas em agroecossistemas sustentáveis. Os autores destacam que, nas próximas décadas, os rendimentos de monocultura tendem a diminuir para muitas culturas – embora o melhoramento genético tenha assegurado o incremento de produtividade de outras culturas – e a demanda por serviços ecossistêmicos continuará a aumentar. Porém esses autores ponderam que promover a diversidade em cultivos agrícolas é uma tarefa difícil em razão dos desafios de origem econômica e cultural. Isso exigiria investimentos financeiros substanciais para desenvolvimento de novos equipamentos de colheita de diversas misturas de sementes. Adicionalmente, há o desafio de identificar, estabelecer e manter misturas de espécies ótimas não só para maximizar o rendimento, mas também outros serviços ecossistêmicos. Muitas vezes há um *trade-off* entre obter altos rendimentos a partir do uso de insumos e aumentar a diversidade, porque os insumos que aumentam o rendimento geralmente diminuem a diversidade. Diante desses desafios, os autores (Isbell et al., 2017) acreditam que a diversificação é alcançável e viável e recomendam duas estratégias complementares para a implementação em sistemas intensivos e extensivos (Tabela 1). A primeira é diversificar agroecossistemas intensivos ou monocultivos por meio de medidas simples como aumentar a diversidade genética das culturas comerciais e plantar cercas vivas ricas em espécies. A segunda estratégia é diversificar os sistemas extensivos como pastagens e florestas plantadas, incluindo o objetivo de superar ou

Tabela 1. Desafios e estratégias para diversificação em agroecossistemas.

| Desafio | Estratégia de diversificação intensiva | Estratégia de diversificação extensiva |
|--|---|---|
| Identificar a composição ótima das espécies e as abundâncias relativas | Realizar experimentos de triagem para identificar as melhores culturas/misturas de plantas (Finn et al., 2013) | Semear/plantar mistura de diversas espécies e permitir que competição e adaptação selecionem as espécies mais aptas (Bullock et al., 2007) |
| Manter a composição ideal das espécies e as abundâncias relativas | Periodicamente, restabelecer as melhores misturas de culturas e utilizar insumos moderados para controlar ervas daninhas ou abundância de espécies (desbaste) | Adicionar periodicamente espécies raras ou apoiar a regeneração natural para permitir que elas se tornem mais abundantes, se as condições ambientais variáveis as tornarem mais adequadas |
| Investir em equipamentos de colheita e diversas misturas de sementes | Desenvolver novos equipamentos para colher diversas misturas de culturas | Produção de escala para reduzir custos de diversas misturas de sementes ou propágulos |
| Generalizar para outras condições ou serviços ambientais | Identificar misturas ótimas de cultura/plantas sob uma ampla gama de condições relevantes | Avaliar até que ponto as espécies mais adequadas são subótimas para os objetivos do serviço ecossistêmico e ajustar as taxas de semeadura adequadamente |

Fonte: Adaptado de Isbell et al. (2017).

apoiar a regeneração natural de áreas remanescentes ou florestas, os quais podem otimizar os rendimentos e os cobenefícios do ecossistema simultaneamente, por exemplo, aumentando o estoque de carbono. Porém, o melhoramento genético de plantas cultivadas em mistura é uma estratégia de longo prazo, que pode ser aplicada aos sistemas intensivos, visto que muitas culturas foram selecionadas para maximizar o rendimento na monocultura, e não na mistura. Sob condições ambientais espacialmente heterogêneas e flutuantes no tempo, diferenças de nicho entre espécies de plantas são úteis para garantir a produção de biomassa e as funções do ecossistema.

A diversificação de culturas pode se tornar uma ferramenta essencial para sustentar a produção de biomassa e os serviços ecossistêmicos em áreas agrícolas, remanescentes ou em florestas plantadas. Assim, aumentar o número e o impacto das ações de conservação da biodi-

versidade nos mais diversos sistemas agrícolas, em diferentes partes do mundo, tem sido considerado um desafio sem precedentes para a sustentabilidade da agricultura e dos recursos naturais (Paul; Knoke, 2015) e também como medidas de adaptação e mitigação às mudanças climáticas.

Desenho de agroecossistemas

O desenho de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis está pautado no desafio de produzir alimentos, fibras e energia em bases sustentáveis, garantindo a segurança alimentar de uma população crescente e diante das mudanças climáticas, preservando o ambiente. Quando adaptados, os agroecossistemas multifuncionais são estratégias basilares para o desenvolvimento sustentável de regiões áridas,

semiáridas e sub-húmidas e possuem uma relação direta com biodiversidade e resiliência.

A importância de se desenvolver desenhos de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis é fortalecida por Isbell et al. (2017). Esses autores afirmam que, em vez de simplesmente se perguntar se, com a mistura de plantas, os rendimentos serão significativamente maiores do que os agroecossistemas atuais, deve-se encorajar o seu uso, mesmo em situações em que os rendimentos sejam semelhantes ou ligeiramente inferiores aos da melhor monocultura. Isso porque a mistura de plantas oferece múltiplas outras vantagens. Os autores também destacam a importância do desenvolvimento de estudos que considerem os custos e os benefícios da diversificação.

Corroborando com Isbell et al. (2017), o desenho para a sustentabilidade e o ecodesign, apresentados e discutidos nos estudos por Tischner (2010) e Vezzoli (2018), requerem a geração de soluções benéficas locais e globais para a sociedade, as comunidades, o ambiente natural e os sistemas econômicos. Nesse sentido, é fundamental transpor os conceitos de sustentabilidade, aplicando-os à agricultura e expandindo o foco técnico e epistemológico centrado no produto para mudanças de nível de sistema. Com esse enfoque, a sustentabilidade é entendida como um desafio em que o homem, as plantas e os demais organismos estão no mesmo nível categórico ou vetorial, com ligações, sobreposições e complementaridades.

Os agroecossistemas podem fornecer múltiplos serviços, tais como produção de alimentos, rações, fibras, combustíveis e produtos madeiros, além do armazenamento de carbono, conservação da biodiversidade e bem-estar humano. Os processos subjacentes a esses serviços ocorrem em diferentes instâncias temporais e escalas espaciais, e a paisagem parece ser a escala apropriada para a avaliação global e gestão do agroecossistema de serviços. É imperativo e urgente, na visão de Poggi e colaboradores (Poggi et al., 2018), projetar paisagens agrícolas sustentáveis como uma solução crucial para garantir suprimentos futuros de alimentos,

combustíveis, fibras e materiais, enquanto se preservam recursos naturais, se mitigam as mudanças climáticas globais e se adapta a elas.

O homem, como integrante da natureza e não usuário dela, tem uma relação intrínseca e multifacetada com todos os elementos que compõem o ambiente, e tem a vantagem adaptativa e evolutiva de mediar os *trade-off* estabelecidos. É importante destacar que as estratégias para desenhar agroecossistemas multifuncionais sustentáveis podem ser vistas em várias escalas: a da parcela, da propriedade, da comunidade e do âmbito da economia e sociedade, porém todos os níveis de inter-relações devem ser obrigatoriamente discutidos (Canuto, 2017), independente da magnitude da escala de planejamento.

Há correlações claras entre biodiversidade, resiliência e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Em relação à biodiversidade, torna-se intuitivo que riqueza é o número de táxons por área, e abundância é o número de indivíduos por área. Ademais a biodiversidade é indicador de impacto da mudança de uso da terra e do manejo adotado. A resiliência consiste na habilidade do sistema de readquirir as formas e funcionalidades presentes anteriormente a um distúrbio. Em outro sentido, a resiliência é a aptidão que tem determinado sistema em restaurar seu estado inicial, após a ação de uma perturbação que tenha provocado nele um desequilíbrio significativo. Dentre as propriedades da resiliência, estão a auto-organização do sistema e o aprendizado e adaptação do mesmo em resposta a um processo disruptivo (Vicenti, 2009).

Além disso, os desenhos ou redesenhos de agroecossistemas, dentro de um enfoque agroecológico, significam estimular a geração de benefícios advindos da biodiversidade, como a autorregularão e o fortalecimento da estabilidade dos mesmos, reduzindo expressivamente a exigência da utilização de insumos externos aos sistemas. Para adquirir graus significativos de estabilidade, a partir das relações ecológicas internas, o desenho ou redesenho dos sistemas agrícolas, baseado na incorporação de médios a

altos graus de biodiversidade, somente poderá desenvolver-se em sistemas complexos.

Uma visão que não pode ser desconsiderada é a da intensificação da agricultura sustentável como meio para superar os desafios prementes de sustentar a população em crescimento, seguindo o princípio de aumentar a produção de alimentos com responsabilidade, mantendo e melhorando os serviços ecossistêmicos (Royal Society of London, 2009; Godfray et al., 2010). Essa intensificação sustentável fornece os principais pontos de entrada para a redução da vulnerabilidade. No entanto, exige decisões abrangentes sobre fatores ambientais e socioeconômicos, como o potencial dos recursos naturais, a intensidade do uso de recursos, a governança, o papel dos mercados e as preferências de consumo, a fim de evitar um foco restrito do setor produtivo. Como a produção agrícola não pode ser intensificada adequadamente em todos os lugares a um custo aceitável, é essencial identificar regiões onde ela seja uma estratégia viável. É importante considerar que o potencial de intensificação é maior nos trópicos úmidos em relação às regiões áridas, semiáridas e subúmidas por causa da disponibilidade e distribuição de água. Entretanto, as terras secas apresentam outras grandes oportunidades para reduzir a vulnerabilidade e alcançar a segurança alimentar (Pretty et al., 2018).

Benefícios da implantação de modelos de agroecossistemas multifuncionais no Semiárido brasileiro

O Semiárido brasileiro, onde vivem 28 milhões de habitantes, tem uma área de aproximadamente 1.022.000 km² (Figura 2A). Essa região possui 1,6 milhão de estabelecimentos agropecuários, dos quais 95% são classificados como agricultura familiar (IBGE, 2012). A mudança de

uso do solo, em razão da retirada da vegetação nativa – utilizada para a produção de energia – e da conversão do seu uso para a produção agrícola e instalação de pastagens, é responsável pela remoção de 46,38% da vegetação da Caatinga (Campello, 2008; Brasil, 2010). Porém essa remoção é fragmentada para abrigar uma diversidade grande de cultivos tanto anuais (Tabela 2) como perenes (Tabela 3), totalizando 30 espécies, cuja produtividade média é de aproximadamente 5 t ha⁻¹, produzidas em monocultivos, em mais de 4 milhões de hectares.

Apenas 1% do território Semiárido está preservado dentro de áreas protegidas. Com pouca prioridade na conservação e carente de estudos ambientais, se comparada a outras florestas brasileiras, a Caatinga nativa foi reduzida significativamente em relação a sua área original (Figura 2B). Além disso, 50 espécies da flora da Caatinga estão ameaçadas de extinção e uma parcela adicional está em risco (Meiado et al., 2012). Para reverter essa situação, uma das estratégias para conservar essas espécies é incorporar produtos oriundos do extrativismo aos sistemas de produção agrícola.

A base da produção de alimentos e geração de renda tem uma natureza diversa, o que facilita a implantação de diversos desenhos de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis. Nesse contexto, o Semiárido brasileiro reúne características que o tornam único em relação às demais regiões do Brasil e do mundo.

Ao longo da última década, pesquisadores da Embrapa Semiárido vêm concentrando esforços e liderando ações de pesquisa para desenvolver modelos de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis para áreas irrigadas, áreas dependentes de chuva e áreas de pastagens, associando ações de preservação e aumento da capacidade de suporte da Caatinga. Assim, foram instalados dois experimentos de longa duração para agricultura irrigada, desenvolvendo modelos para frutícolas, em 2008, e olerícolas, em 2011, e modelos para integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).

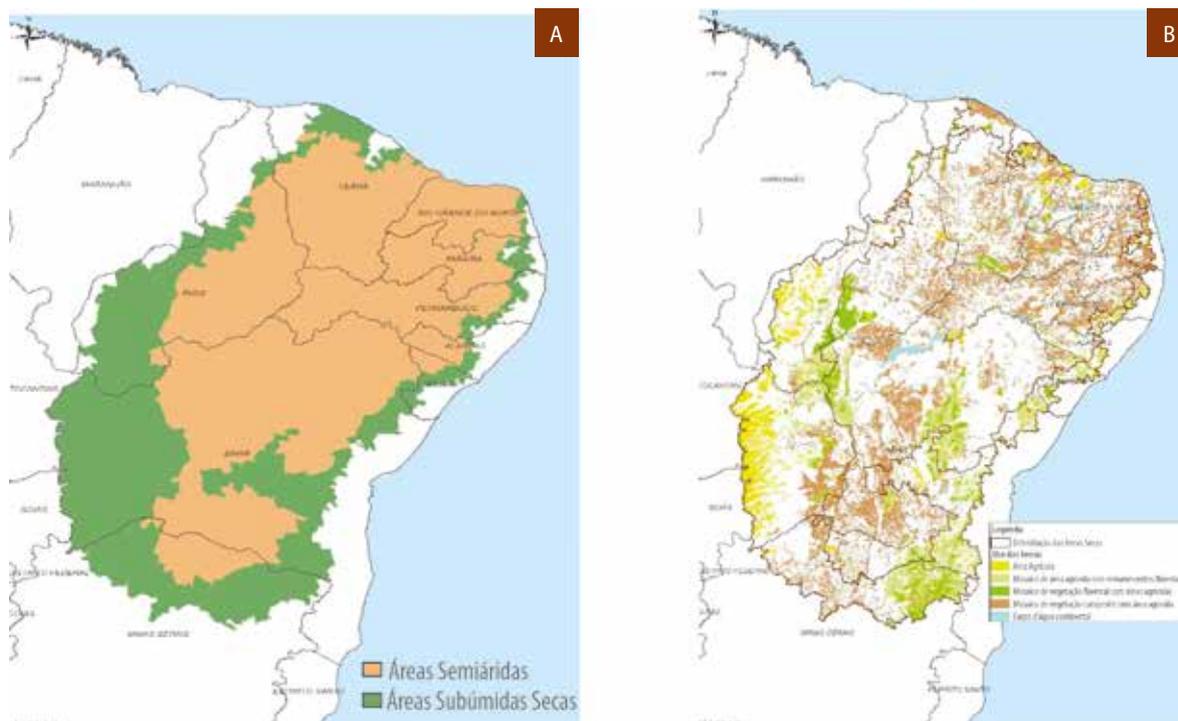


Figura 2. Delimitação das terras secas no Brasil (A) e usos e coberturas vegetais em terras secas (B).

Em relação à agricultura irrigada, foram propostos modelos de agroecossistemas para os cultivos de meloeiro e mangueira (Giongo et al., 2018) eficientes em sequestrar carbono no solo (Giongo et al., 2017b), ciclar nutrientes (Brandão et al., 2017b) e fixar nitrogênio biologicamente (Ferreira Neto et al., 2017), mitigando as emissões de óxido nitroso (N_2O) (Freitas et al., 2018) e dióxido de carbono (CO_2) (Freitas, 2018). Estudos recentes também demonstraram que os agroecossistemas propostos para olerícolas e frutícolas irrigadas têm efeitos positivos na fauna edáfica (Freitas, 2018) e colonização de raízes por fungos micorrízicos. A mitigação do impacto ambiental foi demonstrada pela redução das pegadas de carbono e hídrica, eutroficação das águas, lixiviação, toxidez câncer e não câncer (Santos et al., 2018).

Muitos foram os avanços realizados na área irrigada, mas outros desafios são postos para otimização dos modelos de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis, entre eles: ajustar a recomendação da adubação nitrogenada e de macronutrientes; fornecer tabelas de exportação dos nutrientes pelos cultivos irrigados; en-

tender o mecanismo de estabilização da matéria orgânica e o ponto de saturação de carbono no solo; substituir a matriz energética de origem fóssil ou hidroelétrica por solar ou eólica; e avaliar os impactos ambiental e econômico das soluções tecnológicas integradas nos sistemas de produção, por meio da análise comparativa do modelo vigente e do modelo proposto, integrando as soluções tecnológicas e utilizando como ferramentas a avaliação do ciclo de vida e análise econômica.

As soluções tecnológicas e de inovação, quando analisadas conjuntamente, fornecem modelos de cadeias produtivas sustentáveis e competitivas, registrando a contribuição aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), e que compõem uma agenda mundial para a construção e implementação de políticas públicas. Adicionalmente, a visualização do impacto ambiental e econômico do conjunto das soluções tecnológicas, na forma de um modelo de cadeia produtiva alternativo ao modelo vigente, facilitará a tomada de decisão, tanto na

Tabela 2. Produto e produção no Semiárido brasileiro – cultivos anuais.

| Produto | Área plantada (ha) | Área colhida (ha) | Quantidade produzida (t) | Produtividade (t ha ⁻¹) |
|---|--------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Abacaxi (<i>Ananas comosus</i>) (1.000 frutos) | 7.577 | 7.394 | 203.649 | 27,54 |
| Algodão herbáceo (<i>Gossypium hirsutum</i>) | 54.036 | 51.383 | 70.917 | 1,38 |
| Alho (<i>Allium sativum</i>) | 610 | 610 | 6.338 | 10,39 |
| Arroz (<i>Oryza sativa</i>) (em casca) | 53.523 | 44.251 | 91.367 | 2,06 |
| Batata-doce (<i>Ipomoea batatas</i>) | 6.745 | 6.498 | 58.855 | 9,06 |
| Batata-inglesa (<i>Solanum tuberosum</i>) | 6.313 | 6.313 | 245.129 | 38,83 |
| Cana-de-açúcar (<i>Saccharum officinarum</i>) | 125.525 | 122.378 | 6.884.902 | 56,26 |
| Cebola (<i>Allium cepa</i>) | 10.554 | 10.504 | 221.081 | 21,05 |
| Fava (<i>Vicia faba</i>) (em grão) | 19.430 | 17.670 | 5.493 | 0,31 |
| Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>) (em grão) | 1.091.357 | 902.536 | 336.744 | 0,37 |
| Mamona (<i>Ricinus communis</i>) (baga) | 82.714 | 42.341 | 11.626 | 0,27 |
| Mandioca (<i>Manihot esculenta</i>) | 222.067 | 208.595 | 1.702.433 | 8,16 |
| Melancia (<i>Citrullus lanatus</i>) | 17.955 | 17.740 | 417.400 | 23,53 |
| Melão (<i>Cucumis melo</i>) | 19.231 | 19.196 | 537.299 | 27,99 |
| Milho (<i>Zea mays</i>) (em grão) | 1.326.895 | 1.013.581 | 1.551.446 | 1,53 |
| Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>) (em grão) | 94.502 | 85.738 | 32.694 | 0,38 |
| Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>) | 10.930 | 10.910 | 513.607 | 47,08 |
| Total | 3.149.964 | 2.567.638 | 12.890.980 | 5,02 |

Fonte: Adaptado de IBGE (2013).

esfera pública quanto privada, bem como a incorporação das novas tecnologias propostas.

Os avanços tecnológicos para pecuária vêm sendo desenvolvidos desde a década de 1970 e estão associados ao melhoramento de rebanhos e de plantas forrageiras, recuperação das

pastagens e aumento da capacidade de suporte e preservação da Caatinga. Ações conservacionistas ex situ e in situ, como coleta e armazenamento adequado das sementes florestais, formação de pomares de sementes, replantio de árvores em áreas degradadas, fortalecem o

Tabela 3. Produto e produção no Semiárido brasileiro – cultivos permanentes.

| Produto | Área destinada à colheita (ha) | Área colhida (ha) | Quantidade produzida (t) | Produtividade (t ha ⁻¹) |
|--|--------------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Algodão arbóreo (<i>Gossypium arboreum</i>) | 34 | 32 | 7 | 0,22 |
| Banana (<i>Musa spp.</i>) | 116.247 | 115.547 | 1.600.260 | 13,85 |
| Castanha-de-caju (<i>Anacardium occidentale</i>) | 445.145 | 431.626 | 72.803 | 0,17 |
| Coco-da-baía (<i>Cocos nucifera</i>) | 32.522 | 32.423 | 370.362 | 11,42 |
| Goiaba (<i>Psidium guajava</i>) | 6.265 | 6.229 | 140.240 | 22,51 |
| Laranja (<i>Citrus sinensis</i>) | 27.375 | 27.159 | 376.563 | 13,87 |
| Limão (<i>Citrus Limonium</i>) | 6.406 | 6.406 | 133.117 | 20,78 |
| Maçã (<i>Malus domestica</i>) | 47 | 47 | 702 | 14,94 |
| Mamão (<i>Carica papaya</i>) | 8.768 | 8.752 | 382.595 | 43,72 |
| Manga (<i>Mangifera indica</i>) | 44.937 | 44.881 | 781.112 | 17,40 |
| Maracujá (<i>Passiflora edulis</i>) | 30.340 | 30.298 | 449.153 | 14,82 |
| Sisal ou agave (<i>Agave sisalana</i>) (fibra) | 243.759 | 176.739 | 150.584 | 0,85 |
| Uva (<i>Vitis vinifera</i>) | 8.824 | 8.824 | 281.620 | 31,92 |
| Total | 970.669 | 888.963 | 4.739.118 | 5,33 |

Fonte: Adaptado de IBGE (2013).

portfólio de estratégias e tecnologias disponíveis. A educação para comunidades locais e a pesquisa de técnicas de conservação e reflorestamento de baixo custo são necessárias para a conservação da biodiversidade da Caatinga para promover a inovação. Além disso, a combinação de pastagens com florestas em sistemas agroflorestais (SAFs) pode ser uma alternativa para recuperação de ambos os ecossistemas (Drumond et al., 2004). Também se destacam estratégias de convivência com o Semiárido, preservação da biodiversidade e sustentabilidade dos agroecossistemas e as tecnologias de armazenamento de alimentos e água.

Para algumas regiões, como no Agreste e Tabuleiros Costeiros, existem modelos de sistemas de integração, como pecuária-floresta (IPF) e lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Entretanto,

não há modelos definidos de agroecossistemas multifuncionais para o Sertão, sub-região com a menor pluviosidade. Por isso, a Embrapa Semiárido vem desenvolvendo estudos testando níveis crescentes de complexidade por meio da inserção de biodiversidade. Assim, há a necessidade de acompanhar a evolução dos modelos no tempo, bem como desenvolver soluções de inovações em alguns pontos específicos e neurálgicos para o sucesso de modelos de agroecossistemas multifuncionais para a pecuária.

Na Embrapa Semiárido, as primeiras iniciativas com desenhos de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis contemplando a pecuária ocorreram em 2008 e 2009, quando se iniciou um amplo estudo sobre mudança do uso da terra e estoque de carbono (Cunha et al., 2010; Almeida et al., 2014; Santana et al., 2015; Jesus et al., 2016;

Giongo et al., 2017a). Outra iniciativa foi estabelecer uma curva de fósforo para genótipos de capim-buffel (*Cenchrus* spp.) (Giongo et al., 2015). Há necessidade de se obter informações importantes para criar soluções tecnológicas robustas para o convívio produtivo e sustentável com o Semiárido, destacando-se curvas de resposta à NPK e ao cálcio (Ca) para a recuperação de pastagens, estratégias de recuperação e preservação da Caatinga por meio da adubação corretiva para aumentar a produtividade primária de espécies forrageiras nativas, banco de sementes e mudas de espécies arbóreas, estudos de cenários integrando soluções tecnológicas, entre outros.

Ações de inovação voltadas para a Caatinga, como a conservação de sementes, pesquisa com processos germinativos e fornecimento de sementes, desempenham um papel fundamental na restauração ecológica bem-sucedida. Em ecossistemas semiáridos como a Caatinga, os bancos de sementes são importantes elementos da comunidade, pois as plantas anuais representam uma grande parte da flora e suas sementes podem permanecer viáveis por muitos anos. Esses bancos são caracterizados pela alta variabilidade espacial e temporal e são, particularmente, afetados pelo padrão espacial da vegetação (Meiado et al., 2012; Meiado, 2014). O estudo da qualidade do banco de sementes no solo permite a avaliação do potencial de regeneração, que pode fornecer relevantes informações para a tomada de decisões sobre as ações mais apropriadas na restauração ecológica de uma área degradada (Tres et al., 2007).

Em relação à agricultura dependente de chuva, destaca-se que, por causa da irregularidade das chuvas, não é possível planejar um modelo de produção dependente exclusivamente das precipitações. Assim os esforços para promover a biodiversidade, a estabilidade da produção primária e os agroecossistemas multifuncionais têm se concentrado, nas últimas décadas, no desenvolvimento de estratégias e tecnologias de captação e armazenamento água da chuva (Cavalcanti et al., 1999; Lopes et al., 1999; Silva et al., 2006a; Santos et al., 2007; Brito et al., 2015), produtividade dos cultivos e programas de melhoramento, a exemplo do robusto pro-

grama de feijão-caupi (*vigna unguiculata*) (Silva, 2018; Silva; Santos, 2017).

Desenvolver modelos de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis para ambientes dependentes de chuva no Semiárido é um desafio, por causa dos cenários de mudanças climáticas. Por isso, é imperativo que esses modelos integrem geotecnologias, modelos de previsão, melhoramento genético de plantas, utilização de biotecnologias, estratégia de manejo de solo e de água para potencializar a produtividade dos cultivos e da água. Assim, a gestão eficiente dos recursos naturais, como o solo e a água, é de grande importância para mediar favoravelmente as relações solo-planta-ambiente a fim de compor um sistema produtivo e sustentável no Semiárido, de forma que promova o aumento da biodiversidade e a segurança alimentar.

O grande desafio é sistematizar, desenvolver e implantar soluções tecnológicas para a agricultura de baixa emissão de carbono e entregar modelos de desenho de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis, como estratégias tecnológicas para garantir o acesso a alimentos, energia e água, o bem-estar humano e a preservação do ambiente frente aos processos de degradação antrópicos e cenários de mudanças climáticas globais no Semiárido brasileiro. Nesse sentido, entende-se que o caminho a seguir é fornecer soluções tecnológicas (tecnologias, produtos, processos e conhecimentos) para que governo, agricultores e iniciativa privada possam criar estruturas e vínculos para implantar agroecossistemas sustentáveis à luz da biosfera, integrando conceitos de resiliência, adaptação, mitigação, transformação e preservação em uma abordagem única à ciência reflexiva e colaborativa.

Considerações finais

Os atuais sistemas de produção de alimentos requerem reformas fundamentais em face do crescimento populacional, das mudanças climáticas e da degradação do ambiente. Esta época é caracterizada pela atividade humana influenciando profundamente o clima e o ambiente (Antropoceno). Os pontos de inflexão

podem ser negativos ou positivos. Enquanto um ponto de inflexão negativo pode produzir uma deterioração súbita, rápida e irreversível dos sistemas sociais e ambientais, um ponto de inflexão positivo pode produzir sistemas sociais e ecológicos saudáveis e sustentáveis. A chave para promover pontos de inflexão globais positivos é uma compreensão completa da atividade humana e da história de vida em escala evolutiva, juntamente com a integração abrangente de ciência e tecnologia para produzir políticas e práticas inteligentes de produção de alimentos, particularmente no mundo em desenvolvimento.

Dessa forma, aumentar a eficiência e a escala da agricultura de monocultura intensiva dificilmente conduzirá mudanças socioecológicas em uma direção positiva e sustentável. Assim, agroecossistemas multifuncionais podem compor umas das soluções para o trilema saúde-dieta-ambiente a fim de alcançar um impacto líquido positivo sobre a biodiversidade por meio do aumento antropogênico de ecossistemas com base na fundação ecológica da saúde genética, metabólica e ecossistêmica.

Referências

- ALMEIDA, L. E.; GIONGO, V.; MENDES, A. M. S.; JESUS, T. S. de; SANTOS, C. V. B. dos; CUNHA, T. J. F. Atributos físicos e químicos do solo em diferentes fitofisionomias do Bioma Caatinga e o impacto da mudança do uso da terra. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA SEMIÁRIDO, 9., 2014, Petrolina. **Anais [...]** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2014. p. 147-153. (Embrapa Semiárido. Documentos, 261).
- ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. **Biodiversity and pest management in agroecosystems**. 2. ed. New York: Haworth Press, 2004. 236 p.
- BEGON, M.; TOWNSEND, C. R.; HARPER, J. L. **Ecologia**: de indivíduos a ecossistemas. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 752 p.
- BRANDÃO, S. da S.; GIONGO, V.; OLSZEWSKI, N.; SALVIANO, A. M. Coquetéis vegetais e sistemas de manejo alterando a qualidade do solo e produtividade da mangueira. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 4, p. 1079-1089, 2017a.
- BRANDÃO, S. da S.; SALVIANO, A. M.; OLSZEWSKIA, N.; GIONGO, V. Green manure contributing for nutrients cycling in irrigated environments of the Brazilian Semi-Arid. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 4, p. 519-525, 2017b.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Monitoramento do Bioma Caatinga**. Brasília, DF, 2010. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/relatorio_tecnico_caatinga_2008_2009_72.pdf. Acesso em: 25 mar. 2020.
- BRITO, L. T. de L.; SILVA, M. S. L. da; ANJOS, J. B. dos; OLIVEIRA NETO, M. B. de; BARBOSA, A. G. Tecnologias de captação, manejo e uso da água de chuva no setor rural. In: SANTOS, D. B. dos; MEDEIROS, S. de S.; BRITO, L. T. de L.; GNADLINGER, J.; COHIM, E.; PAZ, V. P. da S.; GHEYI, H. R. (org.). **Captação, manejo e uso de água de chuva**. Campina Grande: Insa: ABCMAC, 2015. p. 241-272.
- BULLOCK, J. M., PYWELL, R. F.; WALKER, K. J. Long-term enhancement of agricultural production by restoration of biodiversity. **Journal of Applied Ecology**, v. 44, p. 6-12, 2007.
- CAMPELLO, B. F. O uso da energia de biomassa no Bioma Caatinga. In: SEMANA DO MEIO AMBIENTE, 5., 2008, Recife. **Mudanças climáticas e o Nordeste brasileiro**. Recife: Fundação Joaquim Nabuco, 2008. 1 CD-ROM.
- CANUTO, J. C. Agroecologia : princípios e estratégias para o desenho de agroecossistemas sustentáveis. **Redes**, v. 22, n. 2, p. 137-151, 2017. DOI: [10.17058/redes.v22i2.9351](https://doi.org/10.17058/redes.v22i2.9351).
- CARDINALE, B. J.; DUFFY, J. E.; GONZALEZ, A.; HOOPER, D. U.; PERRINGS, C.; VENAIL, P.; NARWANI, A.; MACE, G. M.; TILMAN, D.; WARDLE, D. A.; KINZIG, A. P.; DAILY, G. C.; LOREAU, M.; GRACE, J. B.; LARIGAUDERIE, A.; SRIVASTAVA, D. S.; NAEEM, S. Biodiversity loss and its impact on humanity. **Nature**, v. 486, n. 7401, p. 59-67, 2012. DOI: [10.1038/nature11148](https://doi.org/10.1038/nature11148).
- CAVALCANTI, N. de B.; OLIVEIRA, C. A. V.; BRITO, L. T. de L.; RESENDE, G. M. de Utilização das tecnologias de captação de água de chuva na região semi-árida do Nordeste brasileiro. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL SOBRE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE AGUA DE CHUVA, 9., 1999, Petrolina. **Anais [...]** Petrolina: Embrapa Semi-Arido: Singapura: IRCSA, 1999. 1 CD-ROM.
- CUNHA, T. J. F.; PETRERE, V. G.; SILVA, D. J.; MENDES, A. M. S.; MELO, R. F. de; OLIVEIRA NETO, M. B. de; SILVA, M. S. L. da; ALVAREZ, I. A. Principais solos do semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. In: SA, I. B.; SILVA, P. C. G. da. (ed.). **Semiárido brasileiro**: pesquisa, desenvolvimento e inovação. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. p. 50-87
- DRUMOND, M. A.; KIILL, L. H. P.; LIMA, P. C. F.; OLIVEIRA, M. C. de; OLIVEIRA, V. R. de; ALBUQUERQUE, S. G. de; NASCIMENTO, C. E. de S.; CAVALCANTI, J. Estratégias para o uso sustentável da biodiversidade da caatinga. In: SILVA, J. M. C. da; TABARELLI, M.; FONSECA, M. T. da; LINS, L. V. (org.). **Biodiversidade da Caatinga**: áreas e ações prioritárias para a conservação. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente: Universidade Federal de Pernambuco, 2004. p. 329-340.

- FERREIRA NETO, R. A.; FREITAS, A. D. S. de; GIONGO, V.; CAMARGO, P. B.; MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. de S. Nitrogen fixation of Poaceae and Leguminosae in a green manure experiment in the Brazilian semiarid region. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 11, p. 1474-1480, 2017.
- FINN, J. A.; KIRWAN, L.; CONNOLLY, J.; SEBASTIÀ, M. T.; HELGADOTTIR, A.; BAADSHAUG, O. H.; LÜSCHER, A. Ecosystem function enhanced by combining four functional types of plant species in intensively managed grassland mixtures: a 3-year continental-scale field experiment. **Journal of Applied Ecology**, v. 50, n. 2, p. 365-375, 2013. DOI: [10.1111/1365-2664.12041](https://doi.org/10.1111/1365-2664.12041).
- FLORENCE, A. M.; HIGLEY, L. G.; DRIJBER, R. A.; FRANCIS, C. A.; LINDQUIST, J. L. Cover crop mixture diversity, biomass productivity, weed suppression, and stability. **PloS One**, Mar. 2019. DOI: [10.1371/journal.pone.0206195](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206195).
- FREITAS, M. S. C. **Distribuição da fauna epigeica, ciclagem de nutrientes e carbono do solo em um agroecossistema de mangueira no Semiárido**. 2018. 115 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.
- FUNABASHI, M. Human augmentation of ecosystems: objectives for food production and science by 2045. **Nature Science of Food**, n. 2, Aug. 2018. DOI: [10.1038/s41538-018-0026-4](https://doi.org/10.1038/s41538-018-0026-4).
- GABA, S.; LESOURRET, F.; BOUDSOCQ, S.; ENJALBERT, J.; HINSINGER, P.; JOURNET, E. P.; NAVAS, M. L.; WERY, J.; LOUARN, G.; MALÉZIEUX, E.; PELZER, E.; PRUDENT, M.; LAFONTAINE, H. O. Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, p. 607-623, 2015. DOI: [10.1007/s13593-014-0272-z](https://doi.org/10.1007/s13593-014-0272-z).
- GIONGO, V.; SALVIANO, A. M.; ANGELOTTI, F.; TAURA, T. A.; LEITE, L. F. C.; CUNHA, T. J. F. Low carbon technologies for agriculture in dryland: Brazilian experience. In: RAO, C. S.; SHANKER, A. K.; SHANKER, C. (ed.). **Climate resilient agriculture: strategies and perspectives**. Rijeka, Croatia: InTech, 2018. p. 105-127.
- GIONGO, V.; SALVIANO, A. M.; SANTOS, B. R. dos; LEAL, E. F. Phosphorus fertilization and growth of buffel grass (*Cenchrus ciliaris* L.) cultivars. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 34-38, 2015. DOI: [10.1111/1365-2664.12041](https://doi.org/10.1111/1365-2664.12041).
- GIONGO, V.; SALVIANO, A. M.; CUNHA, T. J. F.; SANTANA, M. da S. Impacto da mudança do uso da terra no estoque de carbono do Semiárido brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 36., 2017, Belém, PA. **Amazônia e seus solos: peculiaridades e potencialidades**. Belém, PA: SBCS, 2017a.
- GIONGO, V.; SANTANA, M. da S.; BRANDÃO, S. da S.; SALVIANO, A. M.; COSTA, N. D.; YURI, J. E.; VEZZANI, F. M. Sistema conservacionista de cultivo de melão utilizando coquetéis vegetais no Submédio São Francisco. In: FIGUEIREDO, M. C. B. de; GONDIM, R. S.; ARAGÃO, F. A. S. de. (ed.). **Produção de melão e mudanças climáticas: sistemas conservacionistas de cultivo para redução das pegadas de carbono e hídrica**. Brasília, DF: Embrapa, 2017b. p. 231-253.
- GODFRAY, H. C. J.; BEDDINGTON, J. R.; CRUTE, I. R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J. F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S. M.; TOULMI, C. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 812-818, Feb. 2010. DOI: [10.1126/science.1185383](https://doi.org/10.1126/science.1185383).
- IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2012. 274 p. (IBGE. Manuais técnicos em geociências, 1).
- IBGE. **Produção Agrícola Municipal: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro, 2013.
- ISBELL, F.; ALDER, P. R.; EISENHAEUER, N.; FORNARA, D.; KIMMEL, K.; KREMEN, C.; LETOURNEAU, D. K.; LIEBMAN, M.; POLLEY, H. W.; QUIJAS, S. Benefits of increasing plant diversity in sustainable agroecosystems. **Journal of Ecology**, v. 105, p. 871-879, June 2017. DOI: [10.1111/1365-2745.12789](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12789).
- JESUS, T. S. de; GIONGO, V.; GONÇALVES, M.; SANTANA, M. da S.; ALMEIDA, L. E. da S. Impacto da mudança do uso da terra nos teores de carbono do solo no Semiárido brasileiro. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA SEMIÁRIDO, 11., 2016, Petrolina. **Anais [...]** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2016. p. 143-150. (Embrapa Semiárido. Documentos, 271).
- LOPES, P. R. C.; ANJOS, J. B. dos; SILVA, A. de S.; PORTO, E. R.; SILVA, M. S. L. da; CORDEIRO, G. G. Conservação da capacidade produtiva do solo em sistemas de captação de água de chuva “in situ”. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL SOBRE SISTEMAS DE CAPTACAO DE AGUA DE CHUVA, 9., 1999, Petrolina. **Anais [...]** Petrolina: Embrapa Semi-Arido; Singapura: IRCSA, 1999. 1 CD-ROM.
- MEIADO, M. V. Banco de sementes no solo da Caatinga, uma Floresta Tropical Seca no Nordeste do Brasil. **Informativo Abrates**, v. 24, n. 3, p. 39-43, 2014.
- MEIADO, M. V.; SILVA, F. F. S.; BARBOSA, D. C. de A.; SIQUEIRA FILHO, J. A. de. Diaspore of the Caatinga: a review. In: PIRANI, J. R.; LOHMANN, L. G.; SILVA, R. de M.; SOUZA, V. C. (ed.). **Flora of the Caatingas of the São Francisco river**. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio Editorial, 2012. p. 306-365.
- MUELLER, K.; FORNARA, D. A.; HOBBI, S. E. Root depth distribution and the diversity-productivity relationship in a long-term grassland experiment. **Ecology**, v. 94, n. 4, p. 787-793, Apr. 2013. DOI: [10.1890/12-1399.1](https://doi.org/10.1890/12-1399.1).
- NICHOLLS, C. I.; ALTIERI, M. A. Agroecological principles for the conversion of farming systems: principles, applications, and making the transition **Journal of Ecosystems and Ecography**, Aug. 2017. Disponível em: <https://www.omicsonline.org/open-access/agroecology-principles-for-the-conversion-and->

[redesign-of-farming-systems-2157-7625-55-010.php?aid=72904](https://doi.org/10.1017/s10980-018-0699-8). Acesso em: 5 set. 2019.

PAUL, C.; KNOKE, T. Between land sharing and land sparing—what role remains for forest management and conservation?. **International Forestry Review**, v. 17, n. 2, p. 210-230. 2015.

POGGI, S.; PAPAIX, J.; LAVIGNE, C.; ANGEVIN, F.; LE BER, F.; PARISEY, N.; RICCI, B.; VINATIER, F.; WOHLFAHRT, J. Issues and challenges in landscape models for agriculture : from the representation of agroecosystems to the design of management strategies. **Landscape Ecology**, v. 33, p. 1679-1690, 2018. DOI: [10.1007/s10980-018-0699-8](https://doi.org/10.1007/s10980-018-0699-8).

PRETTY, J.; BENTON, T. G.; BHARUCHA, Z. P.; DICKS, L. V.; FLORA, C. B.; GODFRAY, H. C. J.; GOULSON, D.; HARTLEY, S.; LAMPKIN, N.; MORRIS, C.; PIERZYNSKI, G.; PRASAD, P. V. V.; REGANOLD, J.; ROCKSTROM J.; SMITH, P.; THORNE, P.; WRATTEN, S. Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. **Nature Sustainability**, v. 1, p. 441-446, Aug. 2018. DOI: [10.1007/s10980-018-0699-8](https://doi.org/10.1007/s10980-018-0699-8).

RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010. 546 p.

RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003. 503 p.

ROYAL SOCIETY OF LONDON. **REAPING the benefits: science and the sustainable intensification of global agriculture**. London, Oct. 2009. 73 p. Disponível em: https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/4294967719.pdf. Acesso em: 22 set. 2019.

SANTANA, M. da S.; FERRÃO, N. G. de M.; LUCENA, E. H. L. de; ANDRADE, I. G. V. de; ALMEIDA, L. E. S.; GIONGO, V. Efeito da mudança do uso da terra nos estoques de carbono e nitrogênio em solos do Semiárido Pernambucano. In: SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 4., 2015, Petrolina. **Experiências e oportunidades para o desenvolvimento**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2015. (Embrapa Semiárido. Documentos, 262).

SANTOS, E. de O. C.; SANTOS, D. N. dos; BRITO, L. T. de L.; SILVA, A. de S. Experiência brasileira sobre captação, armazenamento, gestão e qualidade da água de chuva para consumo humano em comunidades rurais do Haiti. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA DE CHUVA, 6., 2007, Belo Horizonte. **Água de chuva: pesquisas, políticas e desenvolvimento sustentável** - anais. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 1 CD-ROM.

SANTOS, T. de L.; NUNES, A. B. A.; GIONGO, V.; BARROS, V. da S.; FIGUEIREDO, M. C. B. de. Cleaner fruit production with green manure: the case of Brazilian melons. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 260-270, Apr. 2018. DOI: [10.1016/j.jclepro.2017.12.266](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.266).

SILVA, A. de S.; BRITO, L. T. de L. Captação de água de chuva: sustentabilidade ambiental no semi-árido brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA

AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. **Anais [...]** João Pessoa: SBEA, 2006. 1 CD-ROM

SILVA, D. O. M. da; SANTOS, C. A. F. Adaptability and stability parameters of iron and zinc concentrations and grain yield in cowpea lines in the Brazilian Semi-arid region. **Crop Science**, v. 57, n. 6, p. 2922-2931, Oct. 2017. DOI: [10.2135/cropsci2016.06.502](https://doi.org/10.2135/cropsci2016.06.502).

SILVA, D. O. M. da. **Parâmetros de adaptabilidade e estabilidade para produção de grãos, teores de proteínas e minerais em feijão-caupi (vigna unguiculata (L.) walp.) no semiárido brasileiro**. 2018. 190 f. Tese (Doutorado em Recursos Genéticos Vegetais) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana.

SILVA, M. M. P.; OLIVEIRA, L. A. de; DINIZ, C. R.; CEBALLOS, B. S. O. Educação Ambiental para o uso sustentável de água de cisternas em comunidades rurais da Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 1, p. 122-136, 2006.

SRIVASTAVA, R.; SINGH, K. P. Species diversity in dryland and irrigated agroecosystems and marginal grassland ecosystem in dry tropics. **Community Ecology**, v. 6, n. 2, p. 131-141, Dec. 2005. DOI: [10.1556/comec.6.2005.2.2](https://doi.org/10.1556/comec.6.2005.2.2).

TILMAN, D.; CLARK, M. Global diets link environmental sustainability and human health. **Nature**, v. 515, p. 518-522, 2014. DOI: [10.1038/nature13959](https://doi.org/10.1038/nature13959).

TISCHNER, U. Design for Sustainability: where are we and where do we need to go? In: LEARNING NETWORK ON SUSTAINABILITY (LENS) CONFERENCE, 2010, Bangalore, India, 2010. Sustainability in design: now challenges and opportunities for design research, education and practice in the XXI century - proceedings. Sheffield: Greenleaf Publishing, 2010.

TRES, D. R.; SANT'ANNA, C. S.; BASSO, S.; LANGA, R.; RIBAS JÚNIOR, U.; REIS, A. Banco e chuva de sementes como indicadores para a restauração ecológica de matas ciliares. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, p. 309-311, 2007. Suplemento 1.

VEZZOLI, C. Design for sustainability: an introduction. In: VEZZOLI, C.; CESCHIN, F.; OSANJO, L.; M'RITHAA, M. K.; MOALOSI, R.; NAKAZIBWE, V.; DIEHL, J. C. **Designing sustainable energy for all: sustainable product-service system design applied to distributed renewable energy**. Cham: Springer, 2018. p. 103-124.

VINCENTI, R. D. Conceptos y relaciones entre naturaleza, ambiente, desarrollo sostenido y resiliencia. In: ENCUESTO DE GEÓGRAFOS DE AMÉRICA LATINA, 12., 2009, Montevideo. **Anales [...]** Montevideo, [s.n.], 2009. Disponível em: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal12/Teoriaymetodo/Conceptuales/21.pdf>. Acesso em: 25 out. 2019.

WEIBULL, A. C.; ÖSTMAN, Ö.; GRANQVIST, Å. Species richness in agroecosystems: the effect of landscape, habitat and farm management. **Biodiversity & Conservation**, v. 12, n. 7, 1335-1355, 2003.

Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta para o Semiárido

José Henrique de Albuquerque Rangel

Rafael Dantas dos Santos

Samuel Figueiredo de Souza

Ubiratan Piovezan

Evandro Neves Muniz

Introdução

O Agreste e o Sertão, sub-regiões que compõem o Semiárido, compreendem 114 milhões de hectares, dos quais, aproximadamente, 13 milhões de hectares são ocupados com pastagens, sendo 62% com pastagens naturais e 38% com pastagens cultivadas (IBGE, 2017). No entanto, a atividade agropecuária no Semiárido é classificada como de baixa eficiência produtiva (Guedes, 2007). O aumento da densidade populacional e a demanda por alimentos fizeram com que os habitantes do Semiárido explorassem a terra além da sua capacidade produtiva. Dessa forma, observa-se que o modelo de exploração atual da Caatinga carece de sustentabilidade ecológica e econômica (Guedes, 2007).

A pastagem é a fonte de alimento quase que exclusiva dos rebanhos, os quais estão espalhados pelas diversas sub-regiões do Semiárido. No entanto, há maiores concentrações de rebanho no Agreste, onde a capacidade de suporte é maior, e menor concentração no Sertão, onde o clima limita o crescimento das forrageiras. Independente da sub-região, a quantidade de animais está bem acima daquela que as pastagens podem suportar, o levou à crescente degradação do ambiente.

De maneira geral, entre os fatores que causam a degradação das pastagens, citam-se: o excesso de lotação, o manejo inadequado das pastagens, a ausência de práticas conservacionistas do solo e de controle de pragas e invasoras e a falta de adubação, de correção e de manutenção da fertilidade do solo (Kichel et al., 2011).

Dados estatísticos mostram que, nessa região, a probabilidade de sucesso da agricultura de sequeiro (dependente de chuva) é de três décimos, ou seja, a cada dez anos apenas em três se obtém sucesso. Isso mostra o alto risco dessa exploração, evidenciando a necessidade da diversificação agropecuária.

Para a mudança desse cenário, estratégias de restauração, recuperação e proteção de pastagens nativas e cultivadas são de grande utilidade, a exemplo dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). No Semiárido, as pesquisas com sistemas de ILPF ainda são recentes, mas já apresentam resultados bastante satisfatórios. O objetivo dos sistemas ILPF é produzir sequencialmente ou simultaneamente forragem, alimento e madeira, racionalizando o uso do solo e de outros recursos naturais, procurando aumentar a capacidade de suporte, a produtividade total e a eficiência produtiva dos sistemas de produção, que incluem o componente pecuário.

Conceituação de integração lavoura-pecuária-floresta

A ILPF é uma estratégia de produção agropecuária que integra diferentes sistemas produtivos, agrícolas, pecuários e florestais, dentro da mesma área. Pode ocorrer em cultivo consorciado, em rotação ou sucessão, de forma que haja interação entre os componentes, gerando benefícios mútuos (Balbino et al., 2011a, 2011b).

O sistema ILPF pode ser adotado de diferentes formas, com inúmeras culturas e diversas espécies animais e florestais, adequando-se às características regionais, às condições climáticas, ao mercado local e ao perfil do produtor, sendo plenamente possível sua adoção por pequenos, médios e grandes produtores. Conforme pode ser observado na Tabela 1, a adoção desses sistemas ainda é muito incipiente nos estados que compõem o Semiárido, necessitam, por isso, de um maior número de estratégias efetivas de transferência de tecnologias (Rangel et al., 2015).

Importância e benefícios

O sistema ILPF altera a forma de usar a terra e de pensar as inter-relações entre solo-planta-animal-ambiente, constituindo-se em uma alternativa excelente para regiões com déficit hídrico, por garantir a eficiência produtiva. Esses sistemas são recomendados para a região Semiárida em razão das grandes demandas por produção de alimentos, tanto para a população humana quanto para os rebanhos bovinos, caprinos e ovinos (Balbino et al., 2011c). Ainda é recomendado também para regiões sob grande pressão de preservação dos recursos naturais, demandando a implementação de práticas que façam bom uso da terra, surgindo como uma alternativa a oferecer ganhos relacionados às questões ecológicas, econômicas e sociais (Balbino et al., 2002).

Os arranjos de plantio podem ser os mais variados possíveis, de acordo com as características edafoclimáticas da região (Dias-Filho, 2007). As diferentes estratégias de integração que interagem temporal e espacialmente nos cultivos arbóreos, perenes e anuais têm a capacidade de viabilizar economicamente os sistemas de pro-

Tabela 1. Participação do sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) na atividade agropecuária dos estados do Nordeste.

| Estado | Área sob atividade agropecuária (ha) | Área com ILPF | |
|---------------------|--------------------------------------|------------------|-------------|
| | | ha | % |
| Alagoas | 1.555.272 | 4.619 | 0,30 |
| Bahia | 21.996.269 | 545.778 | 2,48 |
| Ceará | 5.142.852 | 41.380 | 0,80 |
| Maranhão | 4.797.636 | 69.087 | 1,44 |
| Paraíba | 2.152.310 | 136.217 | 6,33 |
| Pernambuco | 4.273.523 | 217.673 | 5,09 |
| Piauí | 5.559.900 | 74.119 | 1,32 |
| Rio Grande do Norte | 2.298.618 | 221.491 | 9,64 |
| Sergipe | 1.281.116 | 1.774 | 0,14 |
| Total | 49.057.496 | 1.312.108 | 2,67 |

dução, por meio da geração de renda imediata nos anos iniciais pela comercialização dos produtos advindos das culturas agrícolas de ciclos curto e médio.

Os benefícios dos sistemas de ILPF são diversos, tais como a oferta de multiprodutos; melhor uso da radiação luminosa; melhor uso do solo e dos nutrientes; controle de plantas invasoras; controle de processos erosivos provocados pelo vento e água; controle de doenças e pragas; maior oferta de forragem; prestação de serviços ambientais; melhoria da ambiência animal; escalonamento do uso da mão de obra; manutenção de água nos sistemas e estabilização do ambiente de produção (Silva et al., 2009).

De acordo com Macedo (2019), são ainda vantagens dos sistemas integrados a quebra do ciclo de pragas e doenças em razão da rotação de culturas, o que diminui também a densidade de bancos ativos de sementes de plantas invasoras. Já para o componente pecuário, a ILPF promove microclima favorável à melhoria do índice de conforto térmico para os animais, que ficam à sombra das árvores, ao contrário do que ocorre quando expostos diretamente à insolação (Karvatte Júnior et al., 2016).

No que tange às questões ambientais, os sistemas integrados possuem elevado potencial de sequestro de carbono, pois acumulam biomassa forrageira e florestal e matéria orgânica no solo, o que reduz a emissão de gases de efeito estufa à atmosfera (Balbino et al., 2011c). A esses aspectos soma-se o aumento da eficiência dos sistemas agrícolas, devido a maior intensidade do uso da terra e a possibilidade de produção de grãos, carne, leite e madeira, simultaneamente ou escalonadamente, otimizando os recursos aplicados e gerando maior renda para o produtor.

Viabilidade dos sistemas de ILPF para a região Nordeste do Brasil

A importância da utilização de sistemas integrados na região Nordeste tem ganhado destaque nesses últimos anos, em decorrência de

problemas relacionados a perdas de produtividade dos solos, perdas de produção provenientes de condicionantes climáticas e problemas socioambientais ligados à exploração madeireira, à demanda de produção de alimentos e à adequação à legislação ambiental.

A região Nordeste do Brasil, sobretudo a região semiárida, é um exemplo típico dessa problemática, pois apresenta solos frágeis e de baixa fertilidade, déficit hídrico na maior parte do tempo e grande pressão sobre os recursos vegetais naturais. A exploração desses recursos de forma irracional e intensiva, com foco imediato, tem concorrido para a degradação da vegetação nativa, comprometendo, consequentemente, o frágil equilíbrio ecológico da região (Ribaski, 1992).

Dentro desse contexto, os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta encontram amplas possibilidades de uso e podem dar significativa contribuição para um desenvolvimento social, econômico e ambiental mais harmônico para a região.

Para a expansão e difusão da ILPF, ainda são necessários estudos de espécies e culturas que se enquadrem como alternativas para o consórcio, focando as inter-relações técnicas entre esses indivíduos e seus resultados econômicos, a fim de fornecer opções para os produtores de acordo com as características das sub-regiões, principalmente relativo ao déficit hídrico. Sendo assim, a pesquisa agropecuária, de uma maneira geral, deve ser realizada de forma integrada e inserida na realidade dos sistemas de produção, para que as tecnologias originadas possam ser transferidas para o produtor com maior eficiência e menor espaço de tempo (Balbino et al., 2011c).

Gliricídia como importante componente dos sistemas integrados no Nordeste

Diante das características produtivas e facilidade de manejo da gliricídia [*Gliricidia sepium*

(Jack.) Walp], alguns estudos apresentam resultados e reforçam argumentos que estimulam ainda mais a recomendação do uso dessa leguminosa para compor sistemas integrados, uma vez que mostra-se viável em diferentes condições edafoclimáticas e que possui a capacidade de melhorar as características de solos, sendo uma opção para áreas em processo de degradação.

Estudos que avaliaram a composição química da gliricídia explorada em sistemas de plantio consorciado ou adensado (Tabela 2) (Figuras 1 e 2) constataram que a leguminosa não apresentou diferenças na sua composição entre os diferentes tipos de plantio, reforçando que pode ser utilizada em diferentes sistemas (Souza et al., 2015a). Por outro lado, em condições edafoclimáticas de litoral, Agreste e Sertão (Tabela 3), os estudos mostraram que a composição químico-bromatológica da gliricídia variou de acordo com essas condições, alterando sua composição de acordo, principalmente, com os índices pluviométricos (Souza et al., 2015b). Esses resultados auxiliam no planejamento de implantação quanto ao sistema produtivo e nas práticas de manejo e utilização da gliricídia ao longo do ano, conforme disponibilidade e perspectivas climáticas previstas.



Foto: Samuel Figueiredo de Souza

Figura 1. Gliricídia [*Gliricidia sepium* (Jack.) Walp] adensada após o corte.

No tocante ao potencial de utilização da gliricídia como ferramenta para recuperação de áreas degradadas, estudos realizados nos estados de Sergipe e Alagoas (Souza et al., 2018) demonstraram que essa leguminosa promove melhoria nas características químicas do solo, tanto em sistemas consorciados, quanto em sistemas adensados de plantio. Observou-se ainda aumento significativo dos teores de matéria orgânica e nitrogênio (Tabela 3), tanto nas áreas adensadas como nas consorciadas; bem como mais concentrações desses elementos nas áreas adensadas do que nas consorciadas (adensada

Tabela 2. Composição químico-bromatológica média de gliricídia [*Gliricidia sepium* (Jack.) Walp] cultivada em diferentes sistemas de plantio e condições edafoclimáticas.⁽¹⁾

| Variável | MS | MM | EE | PB | FDN | FDA |
|-------------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|
| Adensada | 22,58 | 8,48 | 6,30 | 21,13 | 44,62 | 32,14 |
| Consortiada | 22,40 | 8,64 | 5,76 | 20,89 | 44,18 | 28,24 |
| Litoral | 21,92 | 8,85a | 5,58 | 20,92 | 44,59ab | 31,51 |
| Agreste | 24,05 | 7,43b | 6,51 | 20,70 | 48,29a | 30,10 |
| Semiárido | 21,51 | 9,41a | 5,99 | 21,43 | 40,31b | 28,96 |
| EPM | 1,636 | 0,434 | 0,72 | 1,615 | 1,441 | 1,985 |
| P | 0,447 | 0,018 | 0,613 | 0,94 | 0,007 | 0,674 |

⁽¹⁾Matéria seca: MS; Matéria mineral: MM; Proteína bruta: PB; Extrato etéreo: EE; Fibra em detergente neutro: FDN; Fibra em detergente ácido: FDA.

Valores seguidos de letras minúsculas distintas na mesma coluna diferem significativamente entre si a 5% de significância. EPM: erro padrão da média; P: probabilidade.

Fonte: Souza et al. (2015a, 2015b).



Figura 2. Gliricídia [*Gliricidia sepium* (Jack.) Walp] com 90 dias pós-transplante para produção em sistema consorciado com cultivos de girassol (A) e milho (B).

> consorciado > sem gliricídia). Percebeu-se, ainda, aumento dos teores de cálcio e fósforo em ambas as áreas (Tabela 3) com a leguminosa, sem diferenciação entre si (adensada = consorciado > sem gliricídia).

Esses resultados indicam que a gliricídia possui grande capacidade de melhoria das características químicas e, conseqüentemente, da qualidade dos solos, sendo essa ação mais eviden-

te onde houver maior densidade de plantas (Souza et al., 2018). Outra observação foi o aumento da matéria orgânica e do nitrogênio à medida que se aproximava da região litorânea (Litoral > Agreste > Semiárido), indicando que, apesar da capacidade de melhoria dos solos, esse efeito será mais acelerado onde houver maiores índices de pluviosidade, corroborando os dados apresentados por Souza et al. (2015b).

Tabela 3. Concentrações médias dos atributos químicos do solo em matéria orgânica (MO), pH em água, cálcio, magnésio, hidrogênio mais alumínio (H+Al), alumínio, fósforo, potássio, sódio, nitrogênio e capacidade de troca catiônica (CTC), no tratamento testemunha e nos sistemas de plantio adensado e consorciado.

| Atributo químico | Testemunha | Adensado | Consorciado | EPM | P |
|------------------------------------|------------|----------|-------------|-------|-------|
| MO (g kg ⁻¹) | 8,72 c | 20,81 a | 12,04 b | 3,806 | 0,036 |
| pH em água | 5,290 | 5,31 | 5,28 | 0,153 | 0,987 |
| Cálcio (cmolc dm ⁻³) | 1,65 b | 2,30 a | 2,03 a | 0,595 | 0,005 |
| Magnésio (cmolc dm ⁻³) | 1,13 c | 1,53 a | 1,31 b | 0,387 | 0,005 |
| H+Al (cmolc dm ⁻³) | 1,60 c | 2,50 a | 2,34 b | 0,448 | 0,003 |
| Alumínio (mmolc dm ⁻³) | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,153 | 0,072 |
| Fósforo (mg dm ⁻³) | 9,21 b | 21,890 a | 21,48 a | 3,022 | 0,046 |
| Potássio (cmolc dm ⁻³) | 0,19 | 0,23 | 0,21 | 0,073 | 0,002 |
| Sódio (cmolc dm ⁻³) | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,026 | 0,004 |
| Nitrogênio (g kg ⁻¹) | 0,73 c | 1,03 a | 0,98 b | 0,190 | 0,036 |
| CTC (cmolc dm ⁻³) | 4,66 | 6,66 | 5,97 | 1,529 | 0,020 |

Valores seguidos de letras minúsculas distintas na mesma linha diferem significativamente entre si a 5% de significância. EPM: erro padrão da média; P: probabilidade.

Fonte: Souza et al. (2018).

Conforme descrito por Carvalho Filho et al. (1997), a gliricídia apresenta ampla versatilidade quanto às suas aplicações no meio rural, facilitando a sua aceitação por parte dos produtores. Em trabalhos utilizando a gliricídia em sistemas integrados de produção, mediante depoimentos e entrevistas guiadas, produtores que tiveram acesso à leguminosa em suas áreas produtivas, e que foram capacitados a utilizá-la de maneira adequada, consideraram-na como essencial, pois, além de possibilitar a produção de forragens consorciada à produção de alimentos para o consumo humano, essa planta apresenta um notório valor nutricional, fornecimento anual significativo de biomassa, facilidades múltiplas quanto ao manejo e baixo custo de produção (Andrade et al., 2015).

Dentre os principais aspectos positivos citados pelos produtores, destacam-se a elevada adaptabilidade, a tolerância e a versatilidade da planta, sendo responsável por permitir melhor desenvolvimento das culturas em consórcio, decorrente da fixação biológica de nitrogênio e ciclagem de nutrientes, agregando assim maior valorização às áreas de cultivo.

Um sistema de integração pecuária-floresta, desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), demonstra o grande potencial dessa leguminosa consorciada com o capim-marandu (*Brachiaria brizantha* 'Marandu') na alimentação de bovinos e substituição do nitrogênio mineral na fertilização da pastagem (Figura 3), cultivadas em aleias, com espaçamento de 10 m entre linhas de gliricídia e 1 m entre plantas dentro da linha. Na Tabela 4 são apresentados os resultados de ganho de peso de bovinos em pastagem de capim-marandu consorciado com a gliricídia ou fertilizado com diferentes doses de nitrogênio (Araújo, 2014). Na estação chuvosa, o ganho de peso por hectare obtido pelos animais no tratamento consorciado foi semelhante ao maior ganho obtido nos tratamentos fertilizados com nitrogênio mineral. No entanto, na estação seca, o ganho no sistema consorciado foi mais do que o dobro do mais alto obtido nos tratamentos fertilizados com nitrogênio mineral. Considerando o ganho



Foto: José Henrique de Albuquerque Rangel

Figura 3. Sistema de integração capim-marandu (*Brachiaria brizantha* 'Marandu') e gliricídia [*Gliricidia sepium* (Jack.) Walp] em Nossa Senhora das Dores, SE.

anual, o ganho no tratamento consorciado superou em 37% o maior ganho dos tratamentos fertilizados com nitrogênio mineral. Dessa forma, considera-se a gliricídia como uma alternativa técnica viável e sustentável dos pontos de vista econômico, ambiental e social, tornando-se uma ferramenta indispensável aos técnicos da pesquisa e/ou da extensão para proposição de arranjos produtivos (Andrade et al., 2015).

Integração lavoura-pecuária- floresta no Sertão

Várias tentativas de consórcios envolvendo espécies arbóreas e culturas agrícolas não tiveram êxito no Sertão, em razão da baixa eficiência produtiva das culturas agrícolas diante das irregularidades climáticas.

A estratégia utilizada para identificar e adaptar sistemas ILPF a essa região foi a instalação e condução de Unidades de Referência Tecnológica (URTs), que servem para teste de modelos e treinamento de multiplicadores de tecnologias. Algumas dessas URTs estão sendo conduzidas em estações experimentais da Embrapa ou de entidades parceiras do projeto, ou em propriedades particulares localizadas nessa região.

Tabela 4. Ganho de peso animal em kg ha⁻¹ em capim-marandu (*Brachiaria brizantha* 'Marandu'), sob diferentes níveis de fertilização nitrogenada ou em sistema de integração pecuária-floresta (IPF) com gliricídia [*Gliricidia sepium* (Jack.) Walp], em Nossa Senhora das Dores, SE.

| Tratamento (kg ha ⁻¹ ao ano) | Estação das águas | | Estação seca | | Total/ano | |
|--|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | Ganho (kg ha ⁻¹) | Ganho (@ ha ⁻¹) | Ganho (kg ha ⁻¹) | Ganho (@ ha ⁻¹) | Ganho (kg ha ⁻¹) | Ganho (@ ha ⁻¹) |
| 0 N | 204 ^c | 6,8 ^c | 86 ^d | 2,9 ^d | 290 ^d | 9,7 ^d |
| 80 N | 339 ^b | 11,3 ^b | 107 ^c | 3,6 ^c | 446 ^c | 14,9 ^c |
| 160 N | 388 ^a | 12,9 ^a | 115 ^c | 3,8 ^c | 503 ^b | 16,7 ^b |
| 240 N | 350 ^b | 11,7 ^b | 147 ^b | 4,9 ^b | 497 ^b | 16,6 ^b |
| IPF | 381 ^a | 12,7 ^a | 304 ^a | 10,2 ^a | 685 ^a | 22,9 ^a |
| Média | 332 | 11,1 | 152 | 5,1 | 484 | 16,2 |

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey (0,05).

Fonte: Adaptado de Araujo (2014).

As pesquisas com sistemas de integração no Nordeste ainda são recentes, mas já apresentaram resultados bastante satisfatórios. Um dos primeiros modelos de ILPF desenvolvido incorpora a utilização da Caatinga, a qual é parcialmente removida para implantação de palma forrageira e de lavouras temporárias. O uso da Caatinga em sua expressão natural para pastejo por bovinos, ovinos e caprinos é prática muito antiga no Semiárido. Bovinos e ovinos se alimentam do estrato herbáceo nativo durante a estação chuvosa, e os caprinos alimentam-se da copa das árvores. Na estação seca, todos se alimentam de folhas das árvores depositadas no solo.

O manejo racional da vegetação nativa da Caatinga e o desenvolvimento de modelos produtivos que contemplem as espécies nativas representaram um grande avanço para a segurança alimentar e econômica da região. Segundo Voltolini et al. (2010), 70% das espécies da Caatinga fazem parte da dieta dos ruminantes que pastejam nesse ambiente. Espécies nativas como maniçoba (*Manihot pseudoglaziovii* Pax & Hofman), mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), pornunça (*Manihot* sp.), mamãozinho-de-veado (*Jacaratia corumbensis* O. Kuntz), postumeira (*Gomphrena elegans* Mart. var. *elegans*), mandacaru sem espi-

nho (*Cereus hildemarianus* K. Schum.), camaratuba [*Cratylia argentea* (Desv.) Kuntze], umbuzeiro (*Spondia tuberosa* Arr. Cam.), mororó (*Bauhinia* sp.) e sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth) são utilizadas em sistemas isolados ou em consórcio com outras forrageiras herbáceas e arbóreas. Para complementar a estratégia de desenvolver sistemas ILPF na região mais seca do Nordeste, podem ser utilizadas espécies exóticas como capim-buffel (*Cenchrus* spp.), capim-urocloa [*Urochloa mosambicensis* (Hack.) Daudy], palmas forrageiras [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.; *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dick], leucena [*Leucaena leucocephala* (Lam)], gliricídia [*Gliricidia sepium* (Jacq.)], algaroba [*Prosopis juliflora* (Sw.) DC.], destacadas em estudos realizados por Araújo Filho e Carvalho (2001) e Voltolini et al. (2010).

Algumas experiências exitosas de sistemas ILPF acabaram recebendo nomeações próprias, como: Sistema caatinga, capim-buffel e leguminosa (CBL), Cabrito Ecológico e Sistema Sipro.

O Sistema CBL caracteriza-se pela produção de grandes ou pequenos ruminantes, utilizando a vegetação natural da Caatinga, no período chuvoso, associada à área de capim-buffel, com piquetes de um leque de opções forrageiras, especialmente leguminosas (Voltolini et al., 2010). A leucena foi a primeira leguminosa utilizada no

sistema. A adição de adubação nitrogênio pode estar também associada ao sistema CBL, assim como a palma consorciada com a maniçoba, compondo algumas variações e adaptações.

Caprinos de raças ou ecotipos nativos criados semiextensivamente com pastejo em áreas de Caatinga e capim-buffel, com suplementação nos períodos críticos do ano, usando resíduos agrícolas ou concentrados e coprodutos agroindustriais isentos ou com baixos teores de agroquímicos, caracterizam o sistema denominado Cabrito Ecológico (Voltolini et al., 2010).

O sistema integrado de produção experimental (Sipro) é composto por quatro componentes ou subsistemas: agricultura dependente de chuva, agricultura com irrigação de salvação, pecuária baseada na exploração da Caatinga e produção florestal (Guimarães Filho; Vivallo; Pinare, 1989). Nesse sistema, a produção florestal baseia-se no cultivo do sabiá, leucena e algaroba, sendo introduzido como um componente necessário para o fornecimento de estacas de madeira, lenha e carvão para suprir os requerimentos energéticos da propriedade rural. O componente animal é subdividido em três espécies: bovinos de dupla aptidão, caprinos e animais de trabalho. Além disso, existe o consórcio forrageiro, que é constituído de áreas integradas de palma forrageira com algaroba, leucena e/ou gliricídia. Esse sistema permite a obtenção de um desempenho 141% maior, em termos de quilograma de animais comercializados por matriz exposta por ano, do que o observado no sistema tradicional utilizado no sertão pernambucano, promovendo segurança alimentar, econômica e energética.

Considerações finais

Os sistemas de ILPF possuem aplicabilidade para diferentes condições de clima, solo, topografia, tamanho da propriedade, condição social dos atores que constituem o sistema agropecuários da região Nordeste. No Semiárido, as pesquisas com sistemas de ILPF ainda são recentes, mas já apresentam resultados bastante satisfatórios.

Decorrente disso, a adoção desses sistemas ainda é muito incipiente, ocupando menos de 3% da área de exploração agropecuária do Nordeste. Ampliar a adoção dessa tecnologia é uma estratégia de extrema importância para aumentar a segurança alimentar, econômica e energética da população que habita essa região.

Referências

- ANDRADE, B. M. S.; SOUZA, S. F.; SANTOS, C. M. C.; MEDEIROS, S. S.; MOTA, P. S.; CURADO, F. F. Uso da Gliricídia (*Gliricidia sepium*) para alimentação animal em Sistemas Agropecuários Sustentáveis. **Scientia Plena**, v. 11, n. 4, 2015. Disponível em: <https://scientiaplenu.org.br/sp/article/view/2476/1173>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- ARAUJO, H. R. de. **Potencial de um sistemasilvipastoril com Gliricidia em substituição a fertilização nitrogenada em Capim-Marandu**. 2014. 52 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.
- ARAUJO FILHO, J. A. de; CARVALHO, F. C. de. Sistema de produção agrossilvipastoril para o Semiárido Nordeste. In: CARVALHO, M. M.; ALVIM, M. J.; CARNEIRO, J. C. (ed.). **Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2001. p. 102-110.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O. de; STONE, L. F. **Marco referencial: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)**. Brasília, DF: Embrapa, 2011b. 130 p.
- BALBINO, L. C.; BROSSARD, M.; LEPRUN, J. C.; BRUAND, A. Mise en valeur des ferralsols de la région du cerrado (Brésil) et évolution de leurs propriétés physiques: une étude bibliographique. **Étude et Gestion des Sols**, v. 9, p. 83-104, 2002. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/52766881.pdf>. Acesso em: 25 Mar. 2021.
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; MARTINEZ, G. B. Contribuições dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) para uma agricultura de baixa emissão de carbono. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 6, p. 1163-1175, 2011c.
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A. DE; MARTINEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. dos; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 1, p. 1-12, 2011a. DOI: [10.1590/S0100-204X2011001000001](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000001).
- CARVALHO FILHO, O. M.; DRUMOND, M. A.; LANGUIDEY, P. H. **Gliricidia sepium - leguminosa promissora para regiões semiáridas**. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, 1997. 16 p. (EMBRAPA-CPATSA. Circular técnica, 35).

- DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação**. 3. ed. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. 190 p.
- GUEDES, I. M. R. **Sustentabilidade da agricultura no semiárido brasileiro**. 2007. Disponível em: <http://pedogeo.blogspot.com/2007/04/sustentabilidade-daagricultura-no-semi.html>. Acesso em: 5 fev. 2020.
- GUIMARÃES FILHO, C.; VÍVALO PINARE, A. G. **Desempenho técnico e viabilidade econômica de um sistema de produção alternativo para caprinos no Sertão de Pernambuco**. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, 1989. 34 p. (EMBRAPA-CPATSA. Boletim de pesquisa, 37).
- IBGE. **Censo Agropecuário 2017**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- KARVATTE JÚNIOR, N.; KLOSOWSKI, E. S.; ALMEIDA, R. G.; MESQUITA, E. E.; OLIVEIRA, C. C.; ALVES, F. V. Shading effect on microclimate and thermal comfort indexes in integrated crop-livestock-forest systems in the Brazilian Midwest. **International Journal of Biometeorology**, v. 60, p. 1933-1941, May 2016. DOI: [10.1007/s00484-016-1180-5](https://doi.org/10.1007/s00484-016-1180-5).
- KICHEL, A. N.; ALMEIDA, R. G.; COSTA, J. A. A.; BALBINO, L. C. Estratégias de recuperação de pastagem por meio da integração lavoura-pecuária-floresta. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE PECUÁRIA DE CORTE, 7., 2011, Lavras. **Anais [...]** Lavras: Ed. da Ufla, 2011. p. 315-334.
- RANGEL, J. H. A.; MUNIZ, E. N.; AMORIM, J. R. A.; NOGUEIRA JUNIOR, L. R.; SOUZA, S. F.; MORAIS, S. A.; AMARAL, A. J.; PIMENTEL, J. C. M.; SA, C. O. **Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) indicados para a região Nordeste do Brasil**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 9 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Comunicado técnico, 160).
- RIBASKI, J. Sistemas agrofloretais no semi-árido brasileiro. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE ECONOMIA E PLANEJAMENTO FLORESTAL, 2., 1991, Curitiba. **Anais [...]** Colombo: EMBRAPA-CNPF, 1992. v. 1, p. 81-94.
- SILVA, R. A. da; SILVA, J. M. da; MENARIM FILHO, A. O benefício dos sistemas agrofloretais (SAF's) para a agropecuária brasileira. **Revista Meio Ambiente**, n. 18, p. 37-38, 2009.
- SOUZA, S. F.; ANDRADE, B. M. S.; SANTOS, C. M. C.; RANGEL, J. H. A.; MORAIS, J. A. S.; SANTOS, G. R. A.; ALMEIDA, M. R. M. Chemical composition of *Gliricidia sepium* in different cropping systems. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FOREST SYSTEMS, 2015, Brasília, DF. **Proceedings [...]** Bangkok: Asia-Pacific Association of Agricultural Research Institution, 2015a.
- SOUZA, S. F.; ANDRADE, B. M. S.; SANTOS, C. M. C.; RANGEL, J. H. A.; MORAIS, J. A. S.; SANTOS, G. R. A.; ALMEIDA, M. R. M. Chemical composition of *Gliricidia sepium* in different regions of the Sergipe State. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FOREST SYSTEMS, 2015, Brasília, DF. **Proceedings [...]** Bangkok: Asia-Pacific Association of Agricultural Research Institution, 2015b.
- SOUZA, S. F.; RANGEL, J. H. A.; MUNIZ, E. N.; FONTES, H. R.; DELFINO, G. O. A.; JESUS, C. W. S.; ANDRADE, B. M. S.; SOUZA, E. Y. B. *Gliricidia* e seu impacto sob as características químicas do solo em Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, no Nordeste do Brasil. In: REUNIÓN DE LA ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE PRODUCCIÓN ANIMAL, 26., Guayaquil, 2018. **Anais [...]** Guayaquil, 2018.
- VOLTOLINI, T. V.; NEVES, A. L. A.; GUIMARÃES FILHO, C.; SA, C. O. de; NOGUEIRA, D. M.; CAMPECHE, D. F. B.; ARAUJO, G. G. L. de; SA, J. L. de; MOREIRA, J. N.; VESCHI, J. L. A.; SANTOS, R. D. dos; MORAES, S. A. de. Alternativas alimentares e sistemas de produção animal para o Semiárido brasileiro. In: SÁ, I. B.; SILVA, P. C. G. da. (ed.). **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido. 2010. p. 201-242.

Estratégias de mitigação dos efeitos das alterações do clima no Semiárido brasileiro e adaptação dos sistemas produtivos pecuários

Tadeu Vinhas Voltolini
Gláyciane Costa Gois

Introdução

A produção animal contribui consideravelmente para a produção de alimentos, geração de empregos e inserção social e produtiva das famílias da região semiárida brasileira. Ademais, impulsiona as cadeias produtivas, com forte impacto na economia dessa região. No Brasil são estimadas 171,86, 13,77 e 8,25 milhões de cabeças de bovinos, ovinos e caprinos, respectivamente, distribuídas em 3,35 milhões de estabelecimentos agropecuários. Na região Nordeste do Brasil, o rebanho dessas três espécies equivale a 12,6%, 65,6% e 92,8% do plantel nacional, em que grande parte está concentrada no Semiárido (IBGE, 2017). Nessa região, há expressivo número de pessoas ocupadas em atividades agropecuárias, com forte presença de unidades de produção familiares. As diferentes condições edafoclimáticas, de relevo e de vegetação possibilitam a exploração de sistemas produtivos pecuários diversificados, com grande variedade de plantas forrageiras, em sua maioria adaptadas ao clima quente e seco, contribuindo com o suporte alimentar dos rebanhos. A vegetação nativa (Caatinga) também se constitui em recurso forrageiro, sendo utilizada como base alimentar para os rebanhos que, na maioria das situações, são criados de forma extensiva.

Possíveis alterações futuras do clima nessa região, como aumento da temperatura, redução da precipitação pluvial ou aumento da irregu-

laridade na distribuição das chuvas, poderão acentuar situações de deficiência hídrica com efeitos diretos na segurança alimentar, energética e hídrica, impactando na agricultura dependente de chuva e na pecuária. Nesse sentido, as estratégias de mitigação e adaptação são fundamentais para reduzir a vulnerabilidade nas unidades de produção, promovendo melhor eficiência produtiva. A maior produtividade e a geração de alimentos de origem animal estão alinhadas ao aumento das demandas alimentares em virtude do crescimento populacional. A melhoria na eficiência produtiva das atividades pecuárias, mesmo diante de alterações no clima, é decisiva para que os estabelecimentos agropecuários possam ter incremento na renda, além de contribuir no direcionamento para a produção pecuária sustentável.

Impactos das alterações climáticas nos sistemas produtivos pecuários

Os cenários das projeções globais sinalizam para regimes de alterações no clima futuro para diversas regiões brasileiras, entre elas o Semiárido. Os efeitos apontados para essa região são o aumento da ocorrência de eventos extremos, a redução da precipitação pluvial e o aumento da temperatura, do número de dias secos (Natividade et al., 2017), da evapotranspiração

e da deficiência hídrica, com reflexo direto no risco climático para a agricultura (Deressa et al., 2011), o que afetará a produção de alimentos e a renda das famílias, podendo contribuir para deslocamentos de pessoas do meio rural para os centros urbanos.

Está previsto também o aumento da frequência e da intensidade das secas, com consequente redução da disponibilidade de recursos hídricos, o que pode impactar na biodiversidade (Marengo et al., 2013), apesar de a vegetação da Caatinga ser formada por espécies adaptadas às condições regionais (Angelotti et al., 2011).

A população do Nordeste do Brasil também apresenta alta vulnerabilidade às mudanças climáticas, o que é acentuado pelos baixos índices de desenvolvimento social e econômico, considerando que grupos populacionais com piores condições de renda, educação e moradia podem sofrer maiores impactos das alterações no clima (Marques; Oliveira, 2016).

Nos sistemas de produção pecuários, as alterações no clima poderão afetar a produção e a qualidade dos alimentos e das forragens, a disponibilidade de água, o crescimento do animal, o desempenho produtivo e a reprodução. Além disso, essas alterações podem impactar no conforto térmico dos animais, aumentando o estresse calórico, assim como afetar o consumo e a utilização dos alimentos, com consequentes efeitos sobre a produção e a saúde do animal (Rojas-Downing et al., 2017).

Possíveis diminuições na produção de forragem e na capacidade de suporte dos pastos, em virtude de menores precipitações, prejudicarão a geração de produtos de origem animal, a ocupação de pessoas na agropecuária e a movimentação econômica promovida pelas cadeias produtivas pecuárias. As alterações na temperatura e na disponibilidade hídrica podem influenciar as áreas aptas ao cultivo de plantas forrageiras, o que, em maior ou menor grau, poderá promover considerável impacto social e econômico nos sistemas de produção.

Santos et al. (2011), em análise do cenário futuro da pecuária no Semiárido brasileiro, verifi-

caram que poderá haver redução da área apta para culturas forrageiras importantes como a palma forrageira (*Opuntia* sp. e *Nopalea* sp.) e o capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.), o que poderá impactar consideravelmente na produção pecuária, sobretudo nas regiões mais secas, especialmente em decorrência da redução das precipitações e do aumento da temperatura.

Aliado a isso, poderão também ser observados maiores custos de produção em razão das menores produtividades e/ou da incorporação de custos advindos principalmente de maiores usos de insumos externos, como ingredientes para rações e suplementos oriundos de outras localidades, equipamentos para a irrigação e captação de água, além de instalações e equipamentos para amenizar os efeitos do estresse calórico nos animais.

Fontes de emissão de gases de efeito estufa e medidas de mitigação

As ações de mitigação abrangem as medidas que visam reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), além de aumentar o sequestro de carbono nos ecossistemas terrestres. Na produção pecuária, o adequado manejo e uso do solo e a redução da emissão de metano entérico são exemplos de medidas mitigadoras (Angelotti et al., 2011).

Os principais GEE são o gás carbônico (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), os quais estão naturalmente presentes na atmosfera terrestre e contribuem no bloqueio da radiação infravermelha, sendo fundamentais para a manutenção da vida no planeta. Em decorrência das atividades antrópicas, o nível de concentração do CO₂, CH₄ e N₂O vem aumentando na atmosfera (Brasil, 2014).

Os sistemas produtivos pecuários contribuem com as emissões dos GEE de forma direta e indireta, como nas etapas de produção de insumos (Hristov et al., 2017), processamento e trans-

porte (Rojas-Downing et al., 2017). A emissão total de CO₂ no Brasil, no ano de 2010, foi estimada em 739.671 Gigagramas (Gg), dos quais 300.312 Gg foram a partir da mudança no uso da terra, equivalente a 40,6% da emissão total de CO₂, sendo essa atividade a de maior contribuição na emissão desses GEE (Brasil, 2014).

Óxido nitroso

O óxido nitroso (N₂O) vem da deposição dos dejetos nas pastagens, do manejo dos dejetos e da fertilização do solo. As emissões brasileiras no ano de 2010 foram da ordem de 560,49 Gg de N₂O, dos quais 452,45 Gg tiveram origem a partir dos solos agrícolas (80,7%), em que 282,31 Gg foram de emissões diretas; enquanto a emissão de N₂O do manejo de dejetos animal correspondeu a 2,6% do total (Brasil, 2014). Corrêa et al. (2016) destacaram como principais fontes de N₂O as emissões provenientes dos solos agrícolas, das excretas dos animais nas pastagens, do uso de fertilizantes nitrogenados, da aplicação de adubos orgânicos e da incorporação de resíduos agrícolas ao solo.

As deposições de urina e esterco nos pastos se constituem em importantes fontes de emissão de N₂O, principalmente pela desnitrificação do nitrogênio (N), em que o fornecimento de N e carbono (C) nos dejetos aumentam a atividade dos microrganismos, sendo essa atividade influenciada por diversos fatores como a umidade, o pH e a temperatura do solo.

As estratégias para mitigar as emissões de N₂O são aquelas que reduzem o teor de N nas excretas, promovendo melhor eficiência de uso do N contido na dieta do animal. A melhoria na eficiência de utilização do N presente na excreta e nos fertilizantes também é uma importante ferramenta para mitigar a emissão de N₂O (Klein; Ledger, 2005).

As pastagens naturais e cultivadas das regiões semiáridas apresentam, na maioria das situações, baixo teor de proteína, necessitando de maior aporte proteico para o animal por meio de suplementos, o que pode contribuir com o

aumento no consumo e na digestibilidade da forragem, melhorando o desempenho produtivo do animal. A adequação no teor proteico nas dietas dos animais, evitando a falta ou o excesso de N, reduz a excreção desse nutriente e melhora a eficiência produtiva do animal. Hou et al. (2015) efetuaram uma meta-análise sobre a mitigação de amônia, N₂O e CH₄, a partir de diferentes estratégias de manejo de dejetos utilizando os resultados de 126 estudos publicados e verificaram que a redução nos teores proteicos dos alimentos e a acidificação dos dejetos foram as medidas que promoveram maiores contribuições na mitigação da emissão de N₂O.

No manejo de dejetos, a redução no tempo de estocagem, a compostagem e o manejo da aplicação dos fertilizantes (incorporação, tempo de aplicação) são medidas que contribuem para diminuir a emissão do N (Gerber et al., 2013), evitam doses excessivas e promovem o parcelamento da aplicação, possibilitando uma economia e melhor eficiência dos insumos utilizados. A aplicação inadequada de fertilizantes nitrogenados pode provocar maior volatilização de amônia ou maiores perdas por lixiviação, consistindo em importantes vias de perdas do N, prejudicando a ciclagem de nutrientes, reduzindo a eficiência produtiva e promovendo prejuízos econômicos e ambientais.

O uso de leguminosas nas pastagens é uma fonte importante de N para as plantas, contribuindo ainda para melhorar o teor de proteína na dieta dos animais. Os microrganismos diazotróficos e promotores de crescimento também são potenciais ferramentas para aumentar o aporte de N para as plantas forrageiras, podendo reduzir a utilização de fertilizantes sintéticos.

Hungria et al. (2016) avaliaram a inoculação de *Azospirillum brasilense* em *Brachiaria* sp. (*Urochloa* sp.) e verificaram aumento na produção de forragem e na concentração de N na planta. Na região semiárida brasileira, respostas promissoras com o uso de microrganismos diazotróficos e promotores de crescimento em plantas forrageiras também têm sido obtidas (Antunes, 2016; Santana, 2016).

Dióxido de carbono

O dióxido de carbono (CO₂) tem origem na mudança de uso da terra, como na alteração de um pasto degradado para um com melhor manejo (Rosa et al., 2014). O sequestro de C no solo ocorre principalmente pela adição desse elemento pela síntese de compostos orgânicos no processo de fotossíntese das plantas. Por outro lado, as perdas de C no solo ocorrem pela perda de cobertura vegetal, pela liberação de CO₂ na respiração, pela decomposição microbiana dos resíduos e da matéria orgânica e pelas perdas de C orgânico por lixiviação e erosão (Brandão et al., 2011).

Os estoques de C no solo e vegetação dependem das formas de manejo. Assim, a adoção de estratégias de manejo nas áreas de pastagens e de produção de forragens é importante fonte de acúmulo para reduzir as emissões de CO₂ e aumentar o sequestro de C (Rosendo; Rosa, 2012).

Sampaio e Costa (2012) avaliaram os estoques e os fluxos de C em vegetações no Semiárido brasileiro e estimaram maiores valores para a Caatinga nativa, tanto no solo quanto na biomassa, do que nas áreas utilizadas como pasto nativo, pastos cultivados e lavouras (Tabela 1).

As pastagens podem se constituir como fontes de emissão ou acúmulo de GEE, a depender do manejo adotado. As pastagens degradadas, em decorrência do manejo inadequado e da redução da fertilidade do solo, podem ter seu estoque de C perdido para a atmosfera. A adoção de práticas de manejo do pastejo adequadas e a recomposição da fertilidade são estratégias que

contribuem para o sequestro de C, aumentando os teores de matéria orgânica no solo, proporcionando melhoria nos aspectos qualitativos da planta forrageira, no desempenho produtivo e nas características qualitativas dos produtos de origem animal, além de aumentar a longevidade do pasto.

Segnini et al. (2013) avaliaram os estoques de C em sistemas de produção pecuários e verificaram redução na taxa de acúmulo desse elemento em pastos degradados (Mg ha ano⁻¹). Observaram também que os pastos degradados apresentaram menores estoques de C no solo em relação aos sistemas com altas e moderadas taxas de lotação dos pastos, os quais apresentaram taxas de acúmulo de C positivas, indicando que os pastos tropicais manejados adequadamente podem ser ferramentas importantes para mitigar as emissões de GEE.

Os solos representam o maior reservatório de C superficial, assim o aumento desse elemento no solo tem grande impacto na quantidade armazenada. A emissão de CO₂ do solo é resultante de processos físicos e bioquímicos por meio da oxidação de compostos orgânicos pelos microrganismos heterotróficos aeróbicos (Cerri et al., 2009), sendo a incorporação de C por meio das raízes uma importante fonte desse elemento.

Considerando que os sistemas de produção pecuários da região semiárida brasileira são predominantemente em pastagens, e que a Caatinga representa a pastagem nativa cobrindo grande parte de sua área, é importante a utilização dessa vegetação com estratégias de manejo para fins pastoris.

Tabela 1. Estoques e fixação de carbono (C) pelas vegetações no Semiárido brasileiro.

| Carbono (Tg) | Caatinga | Pasto nativo | Pasto cultivado | Lavoura |
|--|----------|--------------|-----------------|---------|
| Área no Semiárido (10 ³ km ²) | 400 | 300 | 150 | 150 |
| C na biomassa (Tg) | 940 | 225 | 15 | 8 |
| C no solo (Tg) | 4.000 | 2.700 | 1.200 | 1.050 |
| Fixação de C na biomassa (Tg ano ⁻¹) | 180 | 120 | 60 | 38 |

Fonte: Adaptado de Sampaio e Costa (2012).

Em elevadas intensidades de uso do pasto, que leva ao superpastejo, há perdas de C no solo (Souza et al., 2009), podendo haver perdas no número e na composição de plantas na vegetação da Caatinga (Almeida-Cortez et al., 2016), afetando a cobertura vegetal. Assim, é importante a manutenção de taxas de lotação equilibradas com a quantidade de forragem oferecida pelo pasto para favorecer o desempenho produtivo e reprodutivo do animal e a produtividade por unidade de área, na Caatinga (Araújo Filho et al., 2002) e em pastos cultivados (Oliveira et al., 2016).

Estratégias de enriquecimento da vegetação favorecem o aumento da biomassa e das espécies vegetais que são consumidas pelos animais nas áreas de Caatinga. Waters et al. (2017) relatam que a intensidade do pastejo é uma ferramenta importante para evitar as perdas de C no solo. O uso combinado da vegetação nativa da Caatinga, durante o período chuvoso do ano, com outros recursos forrageiros, para a reserva estratégica visando à alimentação dos animais no período seco, se constitui também em estratégia para reduzir a pressão de pastejo sobre a vegetação nativa e melhorar a produtividade (Guimarães Filho; Soares, 1997).

A recuperação de pastagens degradadas é uma das mais importantes medidas mitigadoras de GEE nos sistemas de produção pecuários, podendo proporcionar considerável aumento

na captura de C. No processo de degradação, a produtividade do pasto e o teor de matéria orgânica reduzem, podendo haver aumento na presença de espécies forrageiras de menor aceitação pelos animais e redução na cobertura vegetal com maior suscetibilidade a erosão tornando os solos sujeitos à compactação e à redução da massa microbiana (Fonte et al., 2014). A cobertura vegetal é um aspecto importante de verificação da degradação das pastagens na região semiárida brasileira (Figura 1).

São escassas as estratégias e os modelos de recuperação de pastagens degradadas para a região semiárida brasileira, sobretudo os que contemplam os sistemas integrados de produção agropecuária ou a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Na condição de rotação de culturas, os modelos de ILPF podem contribuir na recuperação pelo aproveitamento da correção de solo e de fertilização promovida para as culturas agrícolas (como milho e feijão). A renda oriunda do cultivo é uma forma de reduzir os custos.

Ydoyaga et al. (2006) avaliaram métodos de recuperação de pastagens degradadas de *Brachiaria decumbens* (*Urochloa decumbens*) no Agreste de Pernambuco por meio de quatro manejos, sendo: 1 – diferimento (exclusão do pastejo de determinada área no final da estação de crescimento da planta forrageira, possibilitando que se acumule forragem para ser utiliza-



Fotos: Tadeu Vinhas Voltolini

Figura 1. Pasto degradado sem cobertura vegetal (A) e pasto diferido com cobertura vegetal (B), em Petrolina, PE.

da durante o período de entressafra); 2 – diferimento e gradagem; 3 – diferimento, gradagem e plantio de milho; e 4 – diferimento, gradagem e plantio direto de milho, associados à adubação nitrogenada (0 e 100 kg de N ha⁻¹) e adubação fosfatada (0 e 100 kg de P₂O₅ ha⁻¹). A massa de forragem foi maior para os métodos de diferimento e diferimento associado ao plantio direto, em relação aos métodos que utilizaram a gradagem. Os métodos com gradagem proporcionaram ainda maior porcentagem de solo descoberto, e as fertilizações contribuíram para o aumento na massa de forragem.

Se por um lado a grande extensão de áreas de pastagens em todo o mundo promove alta emissão de GEE, essa grande área pode também ter papel fundamental na mitigação de GEE e redução da vulnerabilidade às alterações no clima. No Brasil e, especificamente, no Semiárido, não é diferente, pois as pastagens ocupam grandes extensões territoriais. Práticas de manejo que mantenham ou incrementem a matéria orgânica nos solos das pastagens e das áreas de produção de plantas forrageiras, assim como medidas que diminuam o superpastejo, evitando a perda de vegetação, são importantes para a manutenção do C no solo (Berchielli et al., 2012).

A fertilização das áreas de pastagens e a produção de forragem, quando bem conduzidas, podem proporcionar pastagens mais tolerantes ao déficit hídrico, já que plantas bem nutridas possuem sistema radicular maior e mais profundo, capaz de explorar maior volume de solo e melhorar o acesso a água e nutrientes, favorecendo o rápido estabelecimento e contribuindo na recuperação do pasto.

As práticas de manejo e conservação do solo, como os adequados métodos de preparo, evitando as queimadas, a compactação e a erosão, são também medidas importantes para reduzir as perdas de solo e do C e aumentar o sequestro desse elemento. Medidas conservacionistas, como as curvas e os terraços, o plantio direto, a rotação de culturas, o cultivo consorciado e o uso da cobertura morta, podem contribuir nesse processo.

Metano

A emissão de metano (CH₄) é oriunda principalmente da fermentação entérica (Rojas-Downing et al., 2017). A emissão global de CH₄ entérico é estimada em aproximadamente 85 Teragramas (Tg) ao ano. No Brasil, a emissão de CH₄ pela pecuária em 2010 foi estimada em 11.873,20 Gg, em que 11.265,10 Gg foram atribuídos à fermentação entérica e 608,10 Gg ao manejo de dejetos. Os bovinos contribuíram com 96,8% das emissões de CH₄ por fermentação entérica. Com relação ao manejo de dejetos, as emissões dos bovinos representaram 42,5%, as de suínos 35,3% e as de aves 19%, enquanto os outros animais, incluindo os caprinos e ovinos, também contribuíram com 3,2% (Brasil, 2014). Lascano et al. (2010) indicam que sistemas extensivos de produção, a exemplo do que ocorre no Semiárido brasileiro, promovem elevada emissão de CH₄ entérico por unidade de produto de origem animal.

Na pecuária, o CH₄ vem principalmente da fermentação entérica, processo que ocorre em ambiente anaeróbico, com os nutrientes alimentares fermentados por microrganismos ruminais gerando ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), especialmente os ácidos acético, propiônico e butírico e também o CH₄ e o CO₂, os quais são eliminados pela boca e narinas por meio da eructação e respiração (Martin et al., 2009). O CH₄ está diretamente relacionado com a eficiência da fermentação ruminal e com a perda da energia pelo animal, podendo representar entre 2% a 12% da energia bruta do alimento (Johnson; Johnson, 1995).

Os bovinos podem produzir cerca de 250 L dia⁻¹ a 500 L dia⁻¹ de CH₄, já os ovinos e caprinos produzem de 25 L dia⁻¹ a 55 L dia⁻¹, sendo essa produção dependente de diversos fatores, como o tamanho e a categoria do animal e a ingestão de matéria seca (Oliveira et al., 2017). A emissão de CH₄ por caprinos na região semiárida brasileira variou de 13,0 g animal dia⁻¹ a 41,7 g animal dia⁻¹ (Gordiano, 2015; Barbosa et al., 2018), enquanto as emissões de ovinos variaram de 11,4 g animal dia⁻¹ a 19,2 g animal dia⁻¹ (Mota, 2014; Costa, 2016) (Tabela 2).

Tabela 2. Emissão de metano entérico de caprinos e ovinos a partir de estudos realizados na região semiárida brasileira.⁽¹⁾

| g dia ⁻¹ | kg por PC | kg por PC ^{0,75} | g kg ⁻¹ de MS |
|------------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|
| 13,0-31,0 ¹ | 0,7-1,9 ¹ | 1,4-3,9 ¹ | 21,9-58,8 ¹ |
| 27,4-41,7 ² | 0,7-1,2 ² | 1,8-2,9 ² | 43,4-75,0 ² |
| 11,4-16,8 ³ | - | 1,3-2,9 ³ | 13,4-29,4 ³ |
| 15,6-19,2 ⁴ | - | - | - |

⁽¹⁾PC: peso corporal; MS: matéria seca.

Fonte: ¹Barbosa et al. (2018) caprinos confinados alimentados com diferentes proporções de volumoso e concentrado na dieta; ²Gordiano (2015) cabras Repartida e Canindé em pastejo na caatinga, ³Mota (2014), ovinos em pastejo em caatinga raleada enriquecida ou não enriquecida, ⁴Costa (2016), ovinos mestiços Santa Inês em pastejo em caatinga raleada.

A utilização de forragens em estágios menos avançado contendo menor teor de fibras reduz a produção de CH₄, aumenta a eficiência da digestão ruminal e melhora o desempenho produtivo do animal (Oliveira et al., 2017).

A melhoria na qualidade dos alimentos, das forragens e da alimentação, assim como o aumento no fornecimento de ingredientes concentrados, constitui em importantes estratégias para a redução da emissão de CH₄ entérico (Gerber et al., 2013). A composição e a qualidade dos alimentos interferem na fermentação ruminal e nos produtos resultantes desse processo. Dietas à base de volumosos favorecem a formação de acetato, aumentando a produção de H₂ e de CH₄ por unidade de matéria orgânica fermentada (Johnson; Johnson, 1995), podendo os animais alimentados com forragens de baixa qualidade emitir até duas vezes mais CH₄ em relação aos alimentados com forragens de boa qualidade (Berchielli et al., 2012).

A inclusão de concentrado na dieta promove alteração na fermentação ruminal, diminuindo a proporção de acetato:propionato, em razão de os ingredientes concentrados apresentarem maior concentração de carboidratos solúveis e melhor digestibilidade, reduzindo a produção de CH₄ entérico (Beauchemin et al., 2008). Zotti e Paulino (2009) citam que o concentrado atua diminuindo o pH ruminal, o que afeta diretamente as bactérias metanogênicas, já que essas são sensíveis a alterações no ambiente ruminal, principalmente no pH.

A emissão de CH₄ proveniente da fermentação ruminal depende, principalmente, do consumo e qualidade dos alimentos, especialmente a digestibilidade da dieta. Dietas com elevada digestibilidade proporcionam menor emissão de CH₄ por unidade de alimento consumido do que as de baixa qualidade. A melhoria na qualidade do alimento e a alteração da microflora ruminal aumentam a retenção de energia, o que reduz a emissão de CH₄ entérico, promovendo menor emissão por unidade de produto de origem animal (carne, leite, e etc.) e propiciando aumento na eficiência produtiva.

Barbosa et al. (2018) avaliaram diferentes proporções de volumoso e concentrado nas rações de caprinos em crescimento em Petrolina, PE, e verificaram que o aumento na proporção de concentrado proporcionou maiores consumos e digestibilidades da matéria seca e orgânica, melhor eficiência alimentar e ganho de peso e menor emissão de CH₄ entérico por unidade de peso corporal de caprinos.

Lima et al. (2016) verificaram redução na emissão de metano com a inclusão de concentrado acima de 50% na ração, indicando que, a partir dessa proporção de concentrado na ração, as alterações nas condições físico-químicas no rúmen e na população microbiana afeta a produção de AGCC, o que resulta em menor relação acetato:propionato com concomitante redução no pH e população de protozoários, o que tem sido sugerido como fator inibidor ao crescimento e a atividade das bactérias metanogênicas

e das celulolíticas. Além disso, o aumento no consumo de carboidratos não fibrosos (CNF), como consequência do aumento na proporção de concentrado, pode contribuir para otimizar a fermentação ruminal, aumentando a produção de propionato que utiliza o H_2 que seria usado pelas bactérias metanogênicas para a produção de CH_4 .

Patra (2013) aponta diversas estratégias como potenciais mitigadoras da emissão de metano entérico, que atuam sobre as bactérias metanogênicas no rúmen, tais como: vacinas antimetanogênicas, drenos alternativos de nitrogênio (nitrato, sulfato, potencializadores de propionato e butirato), ácidos orgânicos insaturados, inibidores da produção de hidrogênio (ionóforos, bacteriocinas), assim como os metabólitos secundários de plantas (saponinas e taninos) e as fontes lipídicas (gorduras e ácidos graxos).

Os mecanismos de ação dos taninos sobre a metanogênese consistem no efeito direto sobre os microrganismos ruminais em que os polifenóis reagem com a parede celular das bactérias e as enzimas extracelulares segregadas, inibindo o transporte de nutrientes dentro da célula, retardando o crescimento dos microrganismos (McSweeney et al., 2001). O outro efeito é o indireto sobre a degradação da fibra, que surge pela possível formação de complexos tanino-celulose, reduzindo a atividade fibrolítica e a produção de hidrogênio, que é o substrato para os microrganismos (Tavendale et al., 2005).

Jayanegara et al. (2012), a partir de dados de 30 experimentos, verificaram que o aumento na concentração de tanino na dieta leva a redução da emissão de CH_4 , indicando que os efeitos do tanino são esperados a partir de 20 g kg^{-1} de MS. O uso de leguminosas explorando a presença de taninos são algumas das estratégias que podem ser adotadas. A Caatinga apresenta elevada presença de leguminosas, as quais possuem teores consideráveis de taninos (Marques; Oliveira, 2016), demonstrando potencial para a redução de CH_4 (Lucas, 2012; Magalhães et al., 2015; Oliveira, 2016).

As fontes lipídicas para os ruminantes também são alternativas promissoras, uma vez que podem promover a redução da emissão de CH_4 por ação deletéria sobre as bactérias metanogênicas e consumo do H_2 no processo de biohidrogenação (Beauchemin et al., 2008). Martin et al. (2009) sumarizaram dados de estudos in vivo, oriundos de 28 publicações, que avaliaram os efeitos de diferentes fontes de lipídeos sobre a emissão de CH_4 entérico em bovinos e ovinos e verificaram a redução de 3,8% na emissão desse elemento (g kg^{-1} de MS ingerida) para cada 1% de gordura adicionada na dieta.

Patra (2013) avaliou dados de 29 experimentos e verificou que a suplementação com fontes lipídicas reduziram a produção de metano (g dia^{-1} , g kg^{-1} de MS, g kg^{-1} de MS digestível, g kg^{-1} de leite, % da energia bruta ingerida). Os ácidos graxos C12:0 (ácido láurico) e C18:3 (ácido linolênico) apresentaram maiores efeitos sobre a metagênese, se comparados com outros ácidos graxos da dieta. Concluiu-se que a suplementação lipídica com alta concentração de C12:0 e C18:3 e ácidos graxos polinsaturados até 6% da MS são considerados estratégias alimentares para reduzir a emissão de metano entérico sem comprometer a produtividade animal.

Outra fonte de emissão de GEE é formada a partir da deposição dos dejetos dos animais, quando o material orgânico é decomposto em condições anaeróbias. A produção de CH_4 pelos microrganismos metanogênicos é favorecida quando os dejetos são estocados na forma líquida. A compostagem, que consiste em uma forma sólida de manipulação de dejetos animais, diferente da forma líquida, é capaz de suprimir as emissões de CH_4 , entretanto pode aumentar a formação de N_2O (Paustian et al., 2000). O manejo adequado dos dejetos pode trazer benefícios para o ambiente, contribuindo ainda para melhorar a renda nas unidades de produção, já que o CH_4 pode ser utilizado como fonte alternativa de energia.

O balanço de carbono no sistema de produção e a mitigação das emissões

O balanço de C pode ser compreendido como a diferença entre todas as entradas e as saídas de C, normalmente apresentado como CO₂eq, transformando as emissões dos outros gases (N₂O e CH₄) em equivalentes de CO₂. As avaliações em relação ao balanço de GEE possibilitam a análise do sistema produtivo e não apenas do animal.

Figueiredo et al. (2017) estimaram o balanço de GEE (emissões menos drenos) e a pegada de C para a produção de bovinos de corte em três cenários contrastantes de sistemas de produção com pastagens de *Brachiaria*: pastagens degradadas, pastagens manejadas e pastagens integradas com agricultura e floresta (ILPF). A emissão total estimada em dez anos foi maior para o sistema com pastagens manejadas (84.541 kg CO₂ eq ha⁻¹), seguido pelo sistema de ILPF (64.519 kg CO₂ eq ha⁻¹) e pelo sistema degradado (8.004 kg CO₂ eq ha⁻¹), o que parece ruim para os sistemas mais intensificados. O resultado da pegada de C foi de 18,5 kg CO₂ eq kg peso corporal⁻¹ no sistema degradado, seguido por 12,6 kg CO₂ eq kg peso corporal⁻¹ para o sistema de ILPF e 9,4 kg CO₂ eq kg peso corporal⁻¹ para o sistema com pastagens manejadas; sem considerar o potencial de sequestro de C dos solos para o sistema com pastagens manejadas e do solo mais o eucalipto para os sistemas com pastagens integradas no ILPF. Quando considerou o sequestro de C, a pegada de C reduziu para 7,6 e -28,1 kg CO₂ eq kg peso corporal⁻¹ para as pastagens manejadas e para as integradas no ILPF, respectivamente. Considerando-se o sequestro de C do solo e do eucalipto, o sistema de ILPF é capaz de sequestrar mais C, superando as emissões de GEE, gerando créditos de C.

A melhoria da eficiência produtiva na pecuária e a intensificação na produção podem se constituir como importantes ferramentas para reduzir as emissões de GEE por unidade de pro-

duto de origem animal. Mazzetto et al. (2015) verificaram que a intensificação na produção de bovinos de corte, por meio de melhores pastagens e do manejo do rebanho, promove a redução de GEE por unidade de produto animal, proporcionando menor emissão de metano, apesar da maior emissão de N₂O e CO₂, por meio da fertilização e aplicação de calcário. Chizzotti et al. (2011), ao avaliarem os efeitos da idade de abate sobre a emissão de CH₄ de bovinos de corte, observaram que a redução do tempo de abate de 44 para 30, 26, 20 e 14 meses reduziu a emissão de CH₄ em 23,4%, 31,2%, 53% e 67,7%, respectivamente.

Cardoso et al. (2016) relatam ainda que a produção intensiva, além de proporcionar a redução na emissão de GEE por unidade de produto (pegada de carbono), possibilita a diminuição da área exigida em sete vezes da área necessária para a produção de 320 m² kg⁻¹ a 45 m² kg⁻¹ de carcaça, reduzindo a pressão sobre a vegetação nativa. A produção de carcaças aumentou de 43 Mg para 65 Mg por rebanho nos cenários de 1 a 5, e as emissões totais por kg de carcaça foram estimadas reduzidas de 58,3 para 29,4 kg CO₂ eq kg⁻¹ de carcaça.

Medidas de adaptação

As ações de adaptação referem-se ao conjunto de iniciativas e estratégias que permitem modificar os sistemas naturais ou criados pelos homens a um novo ambiente em resposta à alteração no clima atual ou esperada. No Intergovernmental Panel on Climate Change (2014), as ações de adaptação são descritas como específicas para um determinado local e contexto, sem a abordagem única e genérica para reduzir os riscos em todas as situações.

No contexto do Semiárido brasileiro, com grande presença de pastagens degradadas, a escassez hídrica e as elevadas temperaturas podem levar os animais ao estresse calórico, e o agravamento das condições climáticas poderão acentuar esse problema. Nesse sentido, o aumento na oferta de água, o uso de plantas nativas com

potencial forrageiro, a melhoria da eficiência de utilização dos recursos forrageiros adaptados, as ações de manejo com animais na tentativa de amenizar estresses, assim como animais e plantas melhorados a condições de temperaturas mais altas e menos disponibilidade hídrica se constituem em importantes estratégias de adaptação para a pecuária regional.

Estratégias para o aumento na oferta de água para a pecuária

A água para a dessedentação dos animais e produção de seus alimentos são as principais demandas desse recurso natural nas unidades de produção pecuárias, as quais são acentuadas em regiões áridas e semiáridas. Nessas regiões, os animais sofrem com a escassez e a má qualidade das águas, o que pode representar riscos à saúde, afetando a qualidade dos produtos de origem animal.

A coleta e o armazenamento da água da chuva constituem em estratégias de grande importância para ampliar a oferta. Os açudes e os reservatórios artificiais são alternativas para o armazenamento da água e para o aumento no aporte hídrico, contudo podem representar custos elevados.

Brito et al. (2007) avaliaram um método de captação de água do escoamento superficial visando ao maior aporte hídrico para os rebanhos do Semiárido brasileiro, o qual foi composto por uma área de captação de água com o sistema de filtragem, por uma cisterna como reservatório e o bebedouro para a distribuição da água aos animais, podendo proporcionar menores custos em relação aos açudes e aos reservatórios.

Os autores recomendam o uso de diferentes módulos desse método de captação de água na propriedade para aumentar o volume captado e melhorar a distribuição da água para os animais, uma vez que a alteração no clima pode reduzir a disponibilidade de água no Semiárido, reduzindo os volumes de água da chuva a serem captados e armazenados. Nesse sentido,

indicam a necessidade no aumento das áreas de captação (Brito et al., 2010).

O cultivo e a utilização de plantas forrageiras suculentas são estratégias adicionais para o aumento da oferta de água para a produção pecuária. As plantas suculentas apresentam elevada concentração de água, a exemplo da palma forrageira (*Opuntia* sp. e *Nopalea* sp.) e da melancia-forrageira (*Citrullus lanatus* var. citroides), representando reservatório adicional de água. As plantas forrageiras suculentas na dieta contribuem no aporte de água e no balanço hídrico do animal (Araújo, 2015). A menor ingestão de água nos bebedouros por caprinos foi observada por Bispo et al. (2007), com o aumento no fornecimento de palma forrageira na ração em substituição ao feno de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.).

Na produção de alimentos, o uso da água de forma eficiente, proporcionando mais alimentos com menos volume desse recurso natural, é um dos maiores desafios na pecuária de regiões áridas e semiáridas. Práticas de manejo do solo podem contribuir com o aumento na disponibilidade de água no solo, permitindo melhor desenvolvimento das culturas forrageiras. O preparo do solo com captação in situ possibilita aumento na infiltração de água e reduz as perdas por escoamento superficial. Alguns métodos de captação in situ que também podem ser utilizados como medida de adaptação são aração em faixa, sulcos barrados (Anjos et al., 2007), aração parcial e aração total.

Recursos forrageiros adaptados e nativos e os sistemas integrados de produção agropecuária

O uso de recursos forrageiros nativos e adaptados ao Semiárido brasileiro, o aumento na eficiência de utilização dessas plantas com melhoria nos sistemas de produção, a conservação de forragem e a utilização desses recursos (Figura 2) consistem em estratégias de adaptação dos sistemas de produção pecuários à alteração futura no clima.



Fotos: Tadeu Vinhas Voltolini

Figura 2. Palma forrageira como fonte de alimentos e água (A), conservação de forragem na forma de silagem (B), gliricídia (*Gliricidia sepium*) (leguminosa) (C) e cultivo de manipóca (planta nativa) (D).

A vegetação nativa deve ser utilizada de acordo com a capacidade de suporte e as peculiaridades de cada área. A utilização de plantas perenes para a alimentação dos rebanhos poderá ser incentivada, pois grande parte dos riscos inerentes à produção de forragem na região está no plantio. Dessa forma, reduzindo-se as operações de plantio, pode-se ter mais sucesso na produção de forragem e animal aliado a menores custos de produção. Nos pastos, visando aumentar a vida útil e a produtividade e minimizar a degradação, é fundamental a aplicação de estratégias de manejo do pastejo. É importante também trabalhar a consorciação dos pastos visando melhorar a dieta dos animais e o aporte de nutrientes ao solo.

Dentre os recursos forrageiros nativos, podem ser destacadas algumas plantas com potencial para serem cultivadas, como a manipóca

[*Manihot glaziovii* Müll. Arg.; *Manihot catingae* Ule; *Manihot carthaginensis* (Jacq.) Müll. Arg.], o mandacaru (*Cereus jamacaru* DC.) e o feijão-bravo [*Cynophalla flexuosa* (L.) J.Presl]. Muitas delas apresentam parâmetros da composição química com consideráveis teores de nutrientes, sendo utilizadas na alimentação animal, com produção de forragem considerável quando se leva em conta as características climáticas da região (Guimarães Filho; Soares, 1997). O estudo e a aplicação de técnicas de cultivo e o uso das plantas nativas poderão contribuir consideravelmente com o aporte dos sistemas produtivos pecuários.

Por um lado, as plantas da Caatinga se desenvolveram ao longo dos anos nas condições ambientais regionais, como elevadas temperaturas, baixas e irregulares precipitações pluviárias, por isso apresentam vantagens competitivas

em comparação com outros recursos forrageiros para o cultivo na região semiárida brasileira, sobretudo nas áreas mais secas. Por outro lado, essas espécies podem apresentar a presença de espinhos e compostos secundários como o tanino e os glicosídeos cianogênicos, em que alguns desses componentes são antinutricionais ou tóxicos aos animais.

Na região semiárida, a estacionalidade na produção de forragem faz com que, na época seca do ano, tenha déficit na quantidade de alimentos a serem destinados aos animais, logo é fundamental a conservação de alimentos. Os principais métodos de conservação de alimentos para animais são a fenação e a ensilagem, objetivando melhorar os índices zootécnicos e econômicos da produção pecuária da região (Silva et al., 2015), ao suprir as deficiências quantitativas e qualitativas do rebanho.

Os sistemas integrados de produção agropecuária ou os modelos ILPF são definidos como sistemas de uso da terra que envolvem dois componentes principais, árvores ou arbustos em conjunto com pastagem e/ou cultura agrícola (Castro Neto et al., 2017). Esses sistemas são considerados eficientes estratégias de manejo para restaurar áreas degradadas, podendo aumentar a produção agrícola e pecuária com potencial de promover o sequestro de C no solo e vegetação. Além de serem estratégias mitigadoras, evitando perdas de CO₂, também são alternativas de adaptação dos sistemas de produção pecuários.

A inclusão do componente florestal propicia benefícios de ordem ambiental e socioeconômica, que refletem em melhoria na eficiência do uso da terra. Além disso, promove impactos positivos em variáveis microclimáticas e na captura de C, em que as árvores aumentam a remoção de CO₂ da atmosfera e proporcionam maior conforto térmico aos animais e, quando em maior densidade, aumentam a fixação de C.

A presença de componentes florestais arbóreos adicionados à biodiversidade de espécies propicia a deposição contínua de resíduos vegetais, o que facilita a manutenção da matéria orgâni-

ca no solo afetando diretamente seus atributos físicos, químicos e biológicos. A ILPF pode proporcionar a diversificação na produção; aumentar a fixação biológica de N atmosférico; melhorar a ciclagem de nutrientes; e promover a modificação de microclimas (Mangabeira et al., 2011; Iwata et al., 2012), contribuindo com o aumento na biomassa vegetal, tanto na parte aérea quanto no sistema radicular das plantas, estocando C acima e abaixo do solo em razão da grande quantidade de material orgânico que é adicionada.

Os sistemas agroflorestais podem ser classificados de acordo com seus componentes em agrossilviculturais, silvipastoris e agrossilvipastoris e consistem na diversificação, rotação, consorciação ou sucessão das atividades de agricultura e pecuária na unidade de produção (Fernandes; Finco, 2014). A estimativa do potencial em escala global desses sistemas em sequestrar carbono é de 1,1 Pg a 2,2 Pg de C (1 Pg = 1.015 g ou 1 bilhão de toneladas) durante 50 anos, na parte aérea e no solo. Entretanto, esse potencial varia de acordo com o modelo, composição das espécies, idade das espécies componentes, localização geográfica, fatores ambientais e práticas de manejo (Lorenz; Lal, 2014).

A conversão do pasto degradado em bem manejado e a introdução de sistemas de ILPF podem reduzir as emissões de GEE em kg de CO₂ eq emitido por kg de produto animal gerado, podendo aumentar a produção agrícola, pecuária e de madeira. A redução ocorre principalmente devido ao melhoramento do pasto, aumento na produção animal, sendo uma técnica potencial para sequestrar C no solo e na biomassa visando compensar as emissões de GEE relacionadas com os animais (Figueiredo et al., 2017).

Manejo do rebanho

Considerando o cenário de aumento na temperatura, possibilidade de redução na disponibilidade de alimentos e água para os animais, assim como o aumento no estresse calórico e a redução na eficiência de utilização de alimentos

e nutrientes, o manejo no sistema de proteção e as práticas com os animais e com o rebanho são de fundamental importância para a adaptação dos sistemas produtivos pecuários. A adequação da espécie, raça e categoria de animais a serem criados em cada região é uma medida importante para reduzir a vulnerabilidade produtiva (Lascano et al., 2010), bem como tamanho do rebanho compatível com o suporte hídrico e alimentar da unidade de produção e a diversidade de espécies animais e de genótipos de uma espécie no sistema de produção.

Hoffmann (2010) aponta duas estratégias para a adaptação às alterações no clima, a mudança no ambiente para o animal ou a mudança no animal para o ambiente, indicando que o acesso a tecnologias e ao capital determinará o grau em que os produtores adotarão as estratégias, considerando os custos com energia e água, apontando, ainda, que sistemas extensivos têm capacidade de adaptação limitada.

Na melhoria do ambiente, a utilização de plantas arbóreas nas áreas de descanso dos animais e o aumento da presença de árvores nas pastagens são interessantes, proporcionando sombra a fim de reduzir os impactos do aumento da temperatura, além de reduzir a evaporação da água e manter microclima na área. A localização estratégica de pontos de água (bebedouros, açudes), o aumento e melhor distribuição das árvores no pasto e áreas de sombreamento artificial são ferramentas importantes para amenizar a condição de estresse calórico do animal.

Alcock e Hegarty (2011) avaliaram os efeitos de estratégias de manejo associadas ao melhoramento genético em sistemas de produção de ovinos quanto ao seu impacto de emissão de GEE com o uso de modelos, considerando-se como opções de manejo a época de parição e a alimentação de cordeiros para reduzir o tempo de abate. Esses autores verificaram que as melhorias no manejo proporcionaram menores emissões de GEE e que as medidas que possibilitaram as menores emissões foram as que proporcionaram maiores rentabilidades.

A melhoria nas práticas alimentares e na composição em dietas, promovendo o aumento na

densidade energética e de nutrientes, aumento na frequência de refeições, melhor posicionamento de comedouros e bebedouros nas áreas próximos a pontos de sombra, promoção da alimentação dos animais e o pastejo nas horas mais frescas do dia, o aumento na ventilação permitindo maior circulação de vento, o esfriamento do ambiente e do animal e a suplementação mineral são medidas importantes em situações de estresse calórico, visando promover o bem-estar animal.

Melhoramento genético

O melhoramento genético de plantas e animais pode ser uma ferramenta importante tanto para mitigar a emissão de GEE, quanto para contribuir na adaptação dos sistemas produtivos em cenário de alteração climática futura. Basarab et al. (2013) indicam a seleção de animais por eficiência alimentar, tendo essa característica pouco impacto em outras características de importância econômica. O aumento da produtividade e eficiência será fundamental, mas mantendo diversidade genética que permita maiores oportunidades de seleção para adaptação (Boettcher et al., 2015).

A seleção e o melhoramento genético de espécies vegetais da Caatinga que persistem na condição ambiental local é uma alternativa para o Semiárido brasileiro. As plantas submetidas, ao longo do tempo, a ambientes com disponibilidade hídrica limitada promoveram a geração de plantas adaptadas aos ambientes mais áridos, sendo os estresses abióticos responsáveis por desencadear uma série de respostas nas plantas, percebidas por meio das modificações morfológicas, fisiológicas, moleculares e metabólicas, a fim de tolerar esses estresses (Benko-Iseppon et al., 2012).

Aliado a isso, deve-se buscar a obtenção de animais e forragens que tenham maior eficiência no uso da água e dos nutrientes, sem prejuízos a outras características desejáveis. Nos animais, a seleção para características adaptativas é importante, contudo é preciso definir os indicadores de adaptação e resiliência, ou seja, o objetivo de melhoramento (Boettcher et al., 2015),

sugerindo a avaliação de características relacionadas à produtividade e à resiliência superiores, condições climáticas que se espera que prevaleçam como resultado do aumento na temperatura e menor disponibilidade hídrica.

Para Beleosoff (2013), o uso de forragens com práticas de manejo eficientes, evitando acúmulo de material fibroso, pode diminuir a emissão de metano. Em sistemas extensivos, deve-se aumentar a qualidade da forragem para atingir uma maior média de conteúdo de energia metabolizável (EM). Ao alcançar níveis elevados de EM na forragem, o requerimento de alimento pelo animal é diminuído, possibilitando um menor consumo e menores índices de emissão de CH₄ na atmosfera (Lopes et al., 2013).

O potencial das gramíneas forrageiras em manter aportes da ordem de 20 t a 30 t de matéria seca por hectare ao ano de resíduos aéreos e, em grandeza semelhante, de resíduos subterrâneos, justifica a capacidade das pastagens produtivas, com reservas estáveis de N, em manter estoques de C no solo em níveis superiores ou semelhantes aos observados em solos sob vegetação nativa. Rosa et al. (2014), em estudo sobre o estoque de C nos solos sob pastagens cultivadas em diferentes profundidades, verificaram que a pastagem melhorada apresenta valor mais elevado de C do solo do que a pastagem degradada. Os dados comprovam, segundo os autores, que uma pastagem bem manejada consegue reter no solo (na profundidade de 0–30 cm) 15% a mais de C do que uma pastagem degradada, ressaltando a importância do manejo das pastagens como forma de retirar C da atmosfera e armazenar no solo.

Uma *Poaceae* que desperta o interesse de pesquisadores é o capim-elefante (*Pennisetum purpureum*). Isso se deve ao fato de ser uma planta C4 e, por isso, ser altamente eficiente na fixação de CO₂ atmosférico durante o processo de fotossíntese, possuindo grande capacidade de acumulação de matéria seca, alto teor de lignina, rápido crescimento e alta produção de biomassa, menor ciclo produtivo, possibilidade de mecanização total, além de ser amplamente adaptado às condições edafoclimáticas do Brasil (Xie et al., 2011).

Uma importante medida de adaptação é o melhoramento de genótipos locais e a seleção visando à eficiência de uso de água e nutrientes e a incorporação de indicadores relacionados às alterações futuras no clima, nos programas de melhoramento genético animal. A avaliação e o melhoramento genético de genótipos locais podem se constituir em uma medida útil para os sistemas de produção pecuários, sobretudo nas regiões áridas e semiáridas; sendo assim, deve-se efetuar a conservação de recursos genéticos visando a futuros programas de melhoramento genético. McManus et al. (2012) destacam a possibilidade de transferência de genes que promovam características adaptativas. As raças locais podem conter alelos em seu genótipo com capacidade para conferir resistência a doenças ou a sobrevivência em condições adversas.

Os genótipos locais em manejo tradicional são geralmente mais resilientes a alterações ambientais que as raças melhoradas. Hoffmann (2010) relata que muitas espécies e genótipos locais são adaptados a altas temperaturas, com muitas raças adaptadas a áreas áridas. Contudo, grande parte dos genótipos locais tem em sua adaptação não apenas a tolerância à elevada temperatura, mas a habilidade de crescer e reproduzir em condições de déficit nutricional, incidência de parasitas, em que esses recursos genéticos de áreas áridas poderão ser mais afetados pelo efeito alteração climática nos recursos naturais do que pela temperatura e precipitação, reiterando a atenção ao ambiente de seleção onde o animal vai ser criado para poder selecionar ou suprimir a expressão de genes.

Considerações finais

Os sistemas produtivos pecuários do Semiárido brasileiro poderão ser afetados pelas alterações futuras no clima, com impactos na disponibilidade de alimentos e água, bem como no desempenho produtivo e na saúde do animal. A adequação do teor de N nas dietas e o manejo adequado dos dejetos dos animais podem reduzir a emissão de N₂O. As práticas de manejo do pastejo e a recuperação dos pastos degradados são importantes medidas mitigadoras da

emissão de CO₂, enquanto a melhoria dos alimentos e da alimentação dos animais, os taninos e as fontes lipídicas na alimentação podem contribuir na redução da emissão de CH₄. Assim, a melhoria na eficiência produtiva e intensificação das áreas de produção proporcionam balanços positivos de GEE.

Em regiões como o Semiárido brasileiro, que já apresentam baixa disponibilidade hídrica e elevadas temperaturas, a alteração climática irá acentuar essas condições, sendo necessário expandir e aprimorar os sistemas de coleta e armazenamento de água de chuva e o uso de alimentos suculentos. Além disso, serão necessárias medidas que promovam o bem-estar e amenizem as situações de estresse calórico aos animais, como a adequação das instalações, a maior presença de sombreamento artificial e, sobretudo o natural, nas áreas de criação e nas pastagens, que deverão ser ampliadas. O uso de recursos forrageiros nativos, assim como a melhoria na eficiência de produção e utilização de recursos forrageiros exóticos, associados às técnicas de conservação de alimentos, podem aumentar a oferta de alimentos aos animais. O melhoramento genético é uma ferramenta importante para disponibilização de plantas e animais com maior tolerância aos estresses hídrico e térmico.

Referências

ALCOCK, D. J.; HEGARTY, R. S. Potential effects of animal management and genetic improvement on enteric methane emissions, emissions intensity and productivity of sheep enterprises at Cowra, Australia. **Animal Feed Science and Technology**, v. 166, p. 749-760, June 2011. DOI: [10.1016/j.anifeedsci.2011.04.053](https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.053).

ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; TAVARES, F. M.; SCHULZ, K.; PEREIRA, R. C. A.; CIERJACKS, A. Floristic survey of the caatinga in areas with different grazing intensities, Pernambuco, Northeast Brazil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 1, p. 43-51, 2016. DOI: [10.24221/jeap.1.1.2016.986.43-51](https://doi.org/10.24221/jeap.1.1.2016.986.43-51).

ANGELOTTI, F.; FERNANDES JÚNIOR, P. I.; SÁ, I. B. Mudanças climáticas no Semiárido brasileiro: medidas de mitigação e adaptação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 6, p. 1097-1111, 2011.

ANJOS, J. B. dos; CAVALCANTI, N. B.; BRITO, L. T. L.; SILVA, M. S. L. Captação "in situ": água de chuva para produção de alimentos. In: BRITO, L. T. L.; MOURA, M. S. B.; GAMA, G. F. B. (ed.). **Potencialidades da água de chuva no**

Semiárido brasileiro. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007. p. 141-155.

ANTUNES, G. R. **Diversidade e eficiência na promoção do crescimento vegetal por bactérias isoladas de plantas forrageiras do Semiárido**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina.

ARAÚJO, G. G. L. Os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos e a produção animal em regiões semiáridas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 598-609, 2015.

ARAÚJO FILHO, J. A.; SOUZA NETO, M.; NEIVA, J. N. M.; CAVALCANTE, A. C. R. Desempenho produtivo de ovinos da raça Morada Nova em caatinga raleada sob três taxas de lotação. **Ciência Agrônômica**, v. 33, p. 51-57, jan./jun. 2002.

BARBOSA, A. L.; VOLTOLINI, T. V.; MENEZES, D. R.; MORAES S. A. de; NASCIMENTO, J. C. S.; RODRIGUES, R. T. de S. Intake, digestibility, growth performance, and enteric methane emission of Brazilian semiarid non-descript breed goats fed diets with different forage to concentrate ratios. **Tropical Animal Health and Production**, v. 50, p. 283-289, Feb. 2018. DOI: [10.1007/s11250-017-1427-0](https://doi.org/10.1007/s11250-017-1427-0).

BASARAB, J. A.; BEAUCHEMIN, K. A.; BARON, V. S.; OMINSKI, K. H.; GUAN, L. L.; MILLER, S. P.; CROWLEY, J. J. Reducing GHG emissions through genetic improvement for feed efficiency: effects on economically important traits and enteric methane production. **Animal**, v. 7, p. 303-315, June 2013. DOI: [10.1017/S1751731113000888](https://doi.org/10.1017/S1751731113000888).

BEAUCHEMIN, K. A.; KREUZER, M.; O'MARA, F.; MCALLISTER, T. A. Nutritional management for enteric methane abatement: a review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 48, p. 21-27, Jan. 2008. DOI: [10.1071/EA07199](https://doi.org/10.1071/EA07199).

BELEOSOFF, B. S. **Potencial de produção de gases totais e metano in vitro de pastagens de Panicum maximum Jacq. cv. Tanzânia submetida a diferentes manejos de pastejo**. 2013. 145 f. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

BENKO-ISEPPON, A. M.; CAVALCANTI, N. M. S.; BERLARMINO, L. C.; BEZERRA NETO, J. P.; AMORIM, L. L. B.; FERREIRA NETO, J. R. C.; PANDOLFI, V.; AZEVEDO, H. M. A.; SILVA, R. L. O.; SANTOS, M. G.; ALVES, M. V. S.; KIDO, E. A. Prospecção de genes de resistência à seca e à salinidade em plantas nativas e cultivadas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, p. 1112-1134, 2012.

bispo, T. T.; MESSANA, J. D.; CANESIN, R. C. Produção de metano entérico em pastagens tropicais. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 13, n. 4, p. 954-968, out./dez. 2012. DOI: [10.1590/S1519-99402012000400010](https://doi.org/10.1590/S1519-99402012000400010).

BISPO, S. V.; FERREIRA, M. A.; VÉRAS, A. S. C.; BATISTA, A. M. V.; PESSOA, R. A. S.; BLEUEL, M. P. Palma forrageira em substituição ao feno de capim-elefante: Efeito sobre consumo, digestibilidade e características de fermentação ruminal em ovinos. **Revista Brasileira de**

- Zootecnia**, v. 36, n. 6, p. 1902-1909, nov./dez. 2007. DOI: [10.1590/S1516-35982007000800026](https://doi.org/10.1590/S1516-35982007000800026).
- BOETTCHER, P. J.; HOFFMANN, I.; BAUMUNG, R.; DRUCKER, A. G.; MCMANUS, C.; BERG, P.; STELLA, A.; NILSEN, L. B.; MORAN, D.; NAVES, M.; THOMPSON, M. C. Genetic resources and genomics for adaptation of livestock to climate change. **Frontiers in Genetics**, v. 5, p. 461, Jan. 2015. DOI: [10.3389/fgene.2014.00461](https://doi.org/10.3389/fgene.2014.00461).
- BRANDÃO, S. S.; PIRES, W. N.; GIONGO, V.; CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. M. S.; SILVA, D. J. Produção de fitomassa aérea de coquetéis vegetais cultivados nas entrelinhas de mangueiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia. **Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas: anais**. Uberlândia: SBCS: UFU: Iciag, 2011. 1 CD-ROM.
- BRASIL. **Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações** – MCTIC, 2014. Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/textogeral/sirene.html>. Acesso em: 3 jul. 2020.
- BRITO, L. T. L.; PORTO, E. R.; SILVA, A. de S.; CAVALCANTI, N. B. Cisterna rural: água para o consumo animal. In: BRITO, L. T. L.; MOURA, M. S. B.; GAMA, G. F. B. (ed.). **Potencialidades da água de chuva no Semiárido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007. cap. 5, 105-116.
- BRITO, L. T. L.; SILVA, A. de S.; SILVA, M. S. L.; PORTO, E. R.; PEREIRA, L. A. Tecnologias para o aumento da oferta de água no Semiárido brasileiro. In: SA, I. B.; SILVA, P. C. G. da. (ed.). **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. cap. 9, p. 317-351.
- CARDOSO, A. S.; BERNDT, A.; LEYTEM, A.; ALVES, B. J. R.; CARVALHO, I. N. O.; SOARES, L. H. B.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. **Agricultural Systems**, v. 143, p. 86-96, Mar. 2016. DOI: [10.1016/j.agry.2015.12.007](https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.12.007).
- CASTRO NETO, F.; JACOVINE, L. A. G.; TORRES, C. M. M. E.; OLIVEIRA NETO, S. N.; CASTRO, M. M.; VILLANOVA, P. H.; FERREIRA, G. L. Balanço de carbono: viabilidade econômica de dois sistemas agroflorestais em Viçosa, MG. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 2-9, Aug. 2017. DOI: [10.1590/2179-8087.092114](https://doi.org/10.1590/2179-8087.092114).
- CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, v. 66, p. 831-843, Nov./Dec. 2009. DOI: [10.1590/S0103-90162009000600017](https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000600017).
- CHIZZOTTI, M. L.; LADEIRA, M. M.; MACHADO NETO, O. R.; LOPES, L. S. Eficiência da produção de bovinos e o impacto ambiental da atividade pecuária. In: SIMPÓSIO DE PECUÁRIA DE CORTE, 7.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE PECUÁRIA DE CORTE, 2., 2011, Lavras. **Anais [...]** Lavras: Simpec, 2011. p. 37-60.
- CORRÊA, R. S.; MADARI, B. E.; CARVALHO, G. D.; COSTA, A. R.; PEREIRA, A. C. C.; MEDEIROS, J. C. Fluxos de óxido nítrico e suas relações com atributos físicos e químicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, Sept. p. 1148-1155, 2016. DOI: [10.1590/s0100-204x2016000900014](https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900014).
- COSTA, H. H. A. **Caracterização florística da pastagem nativa da caatinga e efeitos aditivos sobre o consumo, emissão de metano e desempenho de ovinos**. 2016. 109 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- DERESSA, T. T.; HASSAN, R. M.; RINGLER, C. Perception of and adaptation to climate change by farmers in the Nile basin of Ethiopia. **Journal of Agricultural Science**, v. 149, p. 23-31, Aug. 2011. DOI: [10.1017/S0021859610000687](https://doi.org/10.1017/S0021859610000687).
- FERNANDES, M. S.; FINCO, M. V. A. Sistemas de integração lavoura-pecuária e políticas de mudanças climáticas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 2, p. 182-190, Apr./June 2014. DOI: [10.1590/S1983-40632014000200004](https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000200004).
- FIGUEIREDO, E. B.; JAYASUNDARA, S.; BORDONAL, R. O.; BERCHIELLI, T. T.; REIS, R. A.; WAGNER-RIDDLE, C.; SCALA JÚNIOR, N. L. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, Parte 1, p. 420-431, Jan. 2017. DOI: [10.1016/j.jclepro.2016.03.132](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.132).
- FONTE, S. J.; NESPER, M.; HEGGLIN, D.; VELÁSQUEZ, J. E.; RAMIREZ, B.; RAO, I. M.; BERNASCONI, S. M.; BÜNEMANN, E. K.; FROSSARD, E.; OBERSON, A. Pasture degradation impacts soil phosphorus storage via changes to aggregate-associated soil organic matter in highly weathered tropical soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. 150-157, Jan. 2014. DOI: [10.1016/j.soilbio.2013.09.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.025).
- GERBER, P. J.; HRISTOV, A. N.; HENDERSON, B.; MAKAR, H.; OH, J.; LEE, C.; MEINEN, R.; MONTES, F.; OTT, T.; FIRKINS, J.; ROTZ, A.; DELL, C.; ADESOGAN, A. T.; YANG, W. Z.; TRICARICO, J. M.; KEBREAB, E.; WAGHORN, G.; DIJKSTRA, J.; OOSTING, S. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review. **Animal**, v. 7, Supplement 2, p. 220-234, 2013. DOI: [10.1017/S1751731113000876](https://doi.org/10.1017/S1751731113000876).
- GORDIANO, L. A. **Emissão de metano por caprinos em pastejo na Caatinga nos períodos seco e chuvoso**. 2015. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina.
- GUIMARÃES FILHO, C.; SOARES, J. G. G. Desenvolvimento de bezerros desmamados pastejando Caatinga e capim buffel e suplementados com feno de leucena. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 8, p. 861-864, ago. 1997.
- HOFFMANN, I. Climate change and the characterization, breeding and conservation of animal genetic resources. **Animal Genetics**, v. 41, p. 32-46, Apr. 2010. DOI: [10.1111/j.1365-2052.2010.02043.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2010.02043.x).
- HOU, Y.; VELTHOF, G. L.; OENEMA, O. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions from manure management chains: a meta-analysis and

- integrated assessment. **Global Change Biology**, v. 21, n. 3, p. 1293-1312, 2015. DOI: [10.1111/gcb.12767](https://doi.org/10.1111/gcb.12767).
- HRISTOV, A. N.; HARPER, M.; MEINEN, R.; DAY, R.; LOPES, J.; OTT, T.; VENKATESH, A.; RANGLES, C. A. Discrepancies and uncertainties in bottom-up gridded inventories of livestock methane emissions for the contiguous United States. **Environmental Science & Technology**, v. 51, p. 13668-13677, 2017. DOI: [10.1021/acs.est.7b03332](https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03332).
- HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Inoculation of *Brachiaria* spp. with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*: an environmentfriendly component in the reclamation of degraded pastures in the tropics. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 221, p. 125-131, Apr. 2016. DOI: [10.1016/j.agee.2016.01.024](https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.024).
- IBGE. **Pesquisa Pecuária Municipal 2017**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/protabl.asp>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2014: mitigation of climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 1419 p.
- IWATA, B. F.; LEITE, L. F. C.; ARAÚJO, A. S. F.; NUNES, L. A. P. L.; GEHRING, C.; CAMPOS, L. P. Sistemas agroflorestais e seus efeitos sobre os atributos químicos em Argissolo Vermelho-Amarelo do Cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 7, p. 730-738, 2012. DOI: [10.1590/S1415-43662012000700005](https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000700005).
- JAYANEGARA, A.; LEIBER, F.; KREUZER, M. Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants from in vivo and in vitro experiments. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**, v. 96, p. 365-375, June 2012. DOI: [10.1111/j.1439-0396.2011.01172.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2011.01172.x).
- JOHNSON, K. A.; JOHNSON, D. E. Methane emissions from cattle. **Journal of Animal Science**, v. 73, n. 8, p. 2483-2492, Aug. 1995. DOI: [10.2527/1995.7382483x](https://doi.org/10.2527/1995.7382483x).
- KLEIN, C. A. M.; LEDGARD, S. F. Nitrous oxide emissions from New Zealand agriculture—key sources and mitigation strategies. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 72, p. 77-85, 2005. DOI: [10.1007/s10705-004-7357-z](https://doi.org/10.1007/s10705-004-7357-z).
- LASCANO, C. E.; CARDENAS, E. Alternativas para mitigação de emissão de metano em sistemas de criação de animais domésticos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, p. 175-182, 2010. DOI: [10.1590/S1516-35982010001300020](https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300020).
- LIMA, A. R. C.; FERNANDES, M. H. M. R.; TEIXEIRA, I. A. M. A.; FRIGHETTO, R. T. S.; BOMPADRE, T. F. V.; BIAGIOLI, B.; MEISTER, N. C.; RESENDE, K. T. Effects of feed restriction and forage:concentrate ratio on digestibility, methane emission, and energy utilization by goats. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 45, n. 12, p. 781-787, Dec. 2016. DOI: [10.1590/s1806-92902016001200008](https://doi.org/10.1590/s1806-92902016001200008).
- LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L. A.; PINHEIRO, R. S. B. Sistemas de produção de bovinos e a emissão de metano. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, p. 153-158, 2013. DOI: [10.17271/19800827972013543](https://doi.org/10.17271/19800827972013543).
- LORENZ, K.; LAL, R. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, p. 443-454, 2014. DOI: [10.1007/s13593-014-0212-y](https://doi.org/10.1007/s13593-014-0212-y).
- LUCAS, R. C. **Características nutricionais e fatores antinutricionais na fermentação ruminal in vitro de espécies arbóreo-arbustivas nativas e exóticas em área de Caatinga no Sertão de Pernambuco**. 2012. 88 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MAGALHÃES, Y.; GALVANI, D. B.; MACHADO, H. C.; SANTOS, S. F.; SANTOS, V. O.; SOUSA, Y. H. L. Produção de metano decorrente da fermentação in vitro de leguminosas nativas do Bioma Caatinga. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA CAPRINOS E OVINOS, 4., 2015, Sobral. **Anais [...]** Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2015. p. 36-37.
- MANGABEIRA, J. A. C.; TÔSTO, S. G.; ROMEIRO, A. R. **Valoração de serviços ecossistêmicos: estado da arte dos sistemas agroflorestais (SAFs)**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011. 47 p. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 91).
- MARENCO, J. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A.; CAMARGO, H.; RIVEROS, M. P.; PABLÓ, A. D. Two contrasting seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 26, p. 9137-9154, 2013. DOI: [10.1175/JCLI-D-12-00642.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00642.1).
- MARQUES, E. A. T.; OLIVEIRA, L. J. Mudanças climáticas no Nordeste brasileiro e refugiados ambientais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 4, p. 965-984, 2016.
- MARTIN, C.; MORGAVI, D. P.; DOREAU, M. Methane mitigation in ruminants: from microbes to the farm scale. **Animal Science**, v. 4, n. 3, p. 351-365, 2009. DOI: [10.1017/S1751731109990620](https://doi.org/10.1017/S1751731109990620).
- MAZZETTO, A. M.; BARNEZE, A. S.; FEIGL, B. J.; GROENIGEN, J. W. van; OENEMA, O.; KLEIN, C. A. M. de; CERRI, C. C. Use of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) does not mitigate N₂O emission from bovine urine patches under Oxisol in Northwest Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 101, p. 83-92, 2015. DOI: [10.1007/s10705-014-9663-4](https://doi.org/10.1007/s10705-014-9663-4).
- MCMANUS, C.; CANOZZI, M. E.; BRACELLOS, J.; PAIVA, S. R. Pecuária e mudanças climáticas. **Revista UFG**, v. 13, p. 73-82, 2012.
- MCSWEENEY, C. S.; PALMER, B.; MCNEILL, D. M.; OKRAUSE, D. Microbial interactions with tannins: nutritional consequences for ruminants. **Animal Feed Science and Technology**, v. 91, n. 1-2, p. 83-93, May 2001. DOI: [10.1016/S0377-8401\(01\)00232-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00232-2).

- MOTA, C. M. **Fluxo de emissão de metano entérico de ovinos de corte mantidos em sistema agrossilvipastoril e Caatinga degradada**. 2014. 67 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Estadual do Vale do Aracá, Sobral.
- NATIVIDADE, U. A.; GARCIA, S. R.; TORRES, R. R. Tendência dos índices de extremos climáticos observados e projetados no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 600-614, out./dez. 2017. DOI: [10.1590/0102-7786324008](https://doi.org/10.1590/0102-7786324008).
- OLIVEIRA, O. **Caracterização da vegetação espontânea, atividade biológica de taninos condensados e seletividade de ovinos em pastagens nativas**. 2016. 136 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- OLIVEIRA, R. G.; VOLTOLINI, T. V.; MISTURA, C.; MORAES, S. A.; SOUZA, R. A.; SANTOS, B. R. C. Productive performance and carcass characteristics of lambs grazing on pastures of two cultivars of buffel grass and three forage allowance. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 17, p. 374-384, 2016.
- OLIVEIRA, V. S.; SANTANA NETO, J. A.; VALENÇA, R. L.; SANTOS, A. C. P. Estratégias para mitigar a produção de metano entérico. **Veterinária Notícias**, v. 23, p. 39-70, 2017.
- PATRA, A. K. The effect of dietary fats on methane emissions, and its other effects on digestibility, rumen fermentation and lactation performance in cattle: a meta-analysis. **Livestock Science**, v. 155, n. 2-3, p. 244-254, Aug. 2013. DOI: [10.1016/j.livsci.2013.05.023](https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.05.023).
- PAUSTIAN, K.; SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; HUNT, H. W. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 147-163, 2000. DOI: [10.1023/A:1006271331703](https://doi.org/10.1023/A:1006271331703).
- ROJAS-DOWNING, M. M.; NEJADHASHEMI, A. P.; HARRIGAN, T.; WOZNICKI, S. A. Climate change and livestock: impacts, adaptation, and mitigation. **Climate Risk Management**, v. 16, p. 145-163, 2017. DOI: [10.1016/j.crm.2017.02.001](https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001).
- ROSA, R.; SANO, E. E.; ROSENDO, J. S. Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba. **Sociedade & Natureza**, v. 26, p. 333-351, maio/ago. 2014. DOI: [10.1590/1982-451320140210](https://doi.org/10.1590/1982-451320140210).
- ROSENDO, J. S.; ROSA, R. Comparação do estoque de C estimado em pastagens e vegetação nativa de Cerrado. **Sociedade & Natureza**, n. 24, n. 2, p. 359-376, 2012. DOI: [10.1590/S1982-45132012000200014](https://doi.org/10.1590/S1982-45132012000200014).
- SAMPAIO, E. V. S. B.; COSTA, T. L. Estoques e fluxos de carbono no Semi-Árido Nordeste: estimativas preliminares. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 6, p. 1275-1291, 2012.
- SANTANA, S. R. A. **Respostas morfofisiológicas de plantasforrageiras submetidas ao déficit hídrico com inoculação de bactérias diazotróficas**. 2016. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina.
- SANTOS, P. M.; VOLTOLINI, T. V.; CAVALCANTE, A. C. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; BETTIOL, G. M.; CRUZ, P. G. Mudanças climáticas globais e a pecuária: cenários futuros para o Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 6, p. 1176-1196, 2011.
- SEGNINI, A.; OLIVEIRA, P. P. A.; OTAVIANI JUNIOR, P. L.; XAVIER, A. A. P.; PEZZOPANE, J. R. M.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; FERREIRA, E. J.; SPERANÇA, M. A.; RICARDO, J. Assessing soil carbon stocks and accumulation rates in Brazilian livestock production systems. **Advances in Animal Biosciences**, v. 4, p. 339, 2013.
- SILVA, D. S.; ANDRADE, A. P.; MEDEIROS, A. N. Caatinga: produção de pequenos ruminantes à pasto no contexto das mudanças climáticas. In: CONGRESSO NORDESTINO DE PRODUÇÃO ANIMAL, 10., 2015, Teresina. **Anais [...]** Teresina: SNPA, 2015. p. 77-92.
- SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; ANDRIGUETI, M.; CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1829-1836, 2009. DOI: [10.1590/S0100-06832009000600031](https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600031).
- TAVENDALE, M. H.; MEAGHER, L. P.; PACHECO, D.; WALKER, N.; ATTWOOD, G. T.; SIVAKUMARAN, S. Methane production from in vitro rumen incubations with *Lotus pedunculatus* and *Medicago sativa*, and effects of extractable condensed tannin fractions on methanogenesis. **Animal Feed Science and Technology**, v. 123, Part 1, p. 403-419, Sept. 2005. DOI: [10.1016/j.anifeeds.2005.04.037](https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2005.04.037).
- WATERS, C. M.; ORGILL, S. E.; MELVILLE, G. J.; TOOLE, I. D.; SMITH, W. J. Management of grazing intensity in the Semi-Arid Rangelands of Southern Australia: Effects on soil and biodiversity. **Land Degradation & Development**, v. 28, p. 1363-1375, 2017. DOI: [10.1002/ldr.2602](https://doi.org/10.1002/ldr.2602).
- XIE, X. M.; ZHANG, X. Q.; DONG, Z. X.; GUO, H. R. Dynamic changes of lignin contents of MT-1 elephant grass and its closely related cultivars. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1732-1738, May 2011. DOI: [10.1016/j.biombioe.2011.01.018](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.018).
- YDOYAGA, D. F.; LIRA, M. A.; SANTOS, M. V. F.; DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; SILVA, M. C.; SANTOS, V. F.; FERNANDES, A. P. M. Métodos de recuperação de pastagens de *Brachiaria decumbens* Stapf. no agreste Pernambucano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 3, p. 699-705, May/June 2006. DOI: [10.1590/S1516-35982006000300010](https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000300010).
- ZOTTI, C. A.; PAULINO, V. T. **Metano na produção animal: emissão e minimização de seu impacto**. Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 2009. 24 p.

Sementes nativas da Caatinga e clima futuro

Bárbara França Dantas
Francislene Angelotti

Introdução

O clima é uma das características mais importantes do Semiárido brasileiro, principalmente devido a ocorrências de secas estacionais e periódicas, coincidindo com temperaturas altas. Quando comparada a outras formações brasileiras, a Caatinga tem muitas características climáticas extremas, como maior radiação solar, maior temperatura média anual (27 °C), baixa nebulosidade e baixa umidade relativa do ar. Além disso, os baixos volumes de precipitação (300 mm a 800 mm anuais), com distribuição irregular, associados à alta evapotranspiração potencial, provocam déficit hídrico durante todo o ano (Teixeira, 2010; Moura et al., 2015).

Para o sucesso da germinação de sementes e estabelecimento de plantas jovens em ecossistemas sazonalmente secos, como a Caatinga, são adotadas estratégias relacionadas à produção de sementes, à dispersão dos frutos e às características morfofisiológicas das sementes, de maneira que haja tolerância fisiológica às condições ambientais extremas (Meiado et al., 2012). Assim, a vulnerabilidade de uma espécie aos estresses abióticos não é apenas dependente da severidade e duração do estresse (Kraner et al., 2010), mas também da adaptação genética e do fenótipo que pode ser expresso sob diferentes condições ambientais (Seal, 2012). A capacidade adaptativa das plantas da Caatinga, inerente à convivência com anos consecutivos de seca, associada às altas temperaturas, demonstra a potencial resiliência desse ecossistema (Angelotti et al., 2011). Entretanto,

com as mudanças climáticas, cada vez mais as plantas estão sendo expostas a estresses abióticos (Seal, 2012), o que vem alterando significativamente a distribuição de espécies em todo o mundo (Thuiller et al., 2005). Dessa maneira, as mudanças climáticas poderão provocar alterações nos ecossistemas terrestres com mudanças nos padrões globais da vegetação (Brown et al., 1997; Buckeridge, 2008). Em uma região semiárida dos Estados Unidos da América,, por exemplo, foi observada a reorganização de um ecossistema semiárido por meio do aumento de arbustos lenhosos em resposta as alterações de temperatura e da precipitação (Brown et al., 1997).

A distribuição, a migração e a extinção de espécies nos diferentes ecossistemas do mundo, provocadas pelas mudanças no clima, será um grande desafio para a pesquisa, pois poucos estudos têm sido realizados para uma compreensão sobre a vulnerabilidade dessas espécies. As variações em uma comunidade vegetal podem ocorrer ou sazonalmente – em função de fatores abióticos –, ou ao longo de vários anos. Assim, entender como as diferentes espécies responderão às mudanças climáticas, desde a germinação das sementes até o estabelecimento da planta e produção de uma nova geração de sementes, contribuirá para a manutenção dos ecossistemas terrestres.

Dentre as 4.933 (Flora..., 2020) espécies de angiospermas da Caatinga, apenas 353 foram investigadas, em pouco mais de 200 estudos relacionados a sementes (artigos científicos e técnicos, capítulos de livros, monografias, dissertações e teses), desde a década de 1960 (Meiado

et al., 2012; Passos; Cruz, 2015). Nesses trabalhos, as respostas germinativas aos fatores abióticos (água, luz, temperatura, salinidade e tipo de substrato) foram estudadas apenas em 108 espécies, e poucos trabalhos investigaram a influência do clima na produção de sementes. Entre os estudos realizados, as temáticas apontam para as condições ambientais às quais a planta-mãe foi exposta durante a produção das sementes e sua influência nas características morfológicas e fisiológicas. Os trabalhos também relacionam os efeitos da disponibilidade de água, temperatura e oxigênio como elementos essenciais para a germinação (Marcos Filho, 2015).

Este capítulo tem por objetivo relatar a relação entre as respostas fisiológicas de sementes nativas da Caatinga e os estresses ambientais potencializados pelas mudanças do clima, além de apresentar estimativas de respostas de algumas dessas espécies frente aos cenários climáticos futuros.

Estresses abióticos e as sementes nativas da Caatinga

Baixa disponibilidade hídrica

Entre os anos de 2010 e 2020, o Semiárido brasileiro apresentou acentuado déficit na precipitação. Durante esse período, o volume de chuvas da região semiárida foi acima da média apenas em 2011 (Marengo et al., 2016). Na região de Petrolina, PE/Juazeiro, BA, por outro lado, durante todo esse período, as chuvas ocorreram abaixo da média regional, com precipitação de pouco mais 100 mm durante os anos de 2012 e 2017. Além da redução na precipitação, as temperaturas elevadas também foram observadas nesse período (Agrometeorologia, 2020).

Os anos de seca e altas temperaturas no Semiárido influenciaram a produção e qualidade de sementes florestais da Caatinga. Populações de angico-de-carço (*Anadenanthera colubrina*)

produziram, durante esse período, sementes com variação de tamanho e densidade, o que influenciou na sua qualidade fisiológica (germinação e vigor) e tolerância a estresses (Bispo et al., 2017; Gomes et al., 2017, 2019). As sementes de aroeira-do-sertão (*Myracrodruon urundeuva*), produzidas de 2011 a 2017, apresentaram menor germinação quando comparadas com as produzidas em anos anteriores e mais chuvosos (Oliveira et al., 2019).

Na Tabela 1 são apresentadas informações sobre os limites de tolerância de diversas espécies arbóreas nativas da Caatinga a condições de reduzida disponibilidade hídrica, salinidade e altas temperaturas durante a germinação de sementes e fases iniciais de desenvolvimento. Essas espécies demonstram grande variação na tolerância, com diferenças nos potenciais osmóticos limites de -0,2 MPa até -1,0 MPa (Tabela 1).

Entre as espécies com sementes mais tolerantes à restrição hídrica, destacamos lírio-da-caatinga (*Zephyranthes sylvatica*), que apresenta comportamento interessante em relação à germinação em elevados potenciais osmóticos. As sementes dessa espécie apresentam vantagens ecológicas em condições de seca, pois a velocidade de germinação das sementes em -0,8 MPa foi maior comparada às sementes germinadas em água destilada (Silva et al., 2014). Em estudos com restrição hídrica, quanto mais negativo o valor do potencial osmótico, maior o déficit hídrico (Marcos Filho, 2015).

As sementes de catingueira-verdadeira (*Cenostigma pyramidale*) não apresentam alteração na porcentagem de germinação em potenciais osmóticos maiores que -0,6 MPa (Antunes et al., 2011), assim como as sementes de angico-de-bezerro (*Piptadenia moniliformis*), que ainda apresentam até 30% de germinação em -1,2 MPa (Azeredo et al., 2016). Por outro lado, sementes de canafístula (*Peltophorum dubium*) (Perez et al., 2001) e *A. colubrina* (Rego et al., 2011; Dantas et al., 2020) apresentam redução linear da germinação com a redução do potencial osmótico. Curiosamente, uma das espécies mais emblemáticas e comuns na paisagem da Caatinga e conhecida por sua tolerância à

Tabela 1. Limites de tolerância de sementes de espécies nativas da Caatinga à restrição hídrica, salinidade e alta temperatura durante o processo germinativo.

| Espécie (família) | Nome comum | Potencial osmótico base ⁽¹⁾ (MPa) | Temperatura teto ⁽²⁾ (°C) | Autor |
|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|---|
| <i>Amburana cearensis</i> (Arr. Cam.) A.C. Smith. (Fabaceae) | Umburana-de-cheiro; cerejeira | -1,0 ^H | 35* | Almeida et al. (2014) Lúcio et al. (2006) |
| <i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan (Fabaceae) | Angico-de-carçoço | -0,73 ^H -1,09 ^S | 48 | Dantas et al. (2020) |
| <i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart. (Apocynaceae) | Peroba-rosa; pereiro | -0,4 ^H -0,65 ^S | 35* | Dantas et al. (2014) Santos et al. (2014) Affonso et al. (2015) |
| <i>Erythrina velutina</i> Willd. (Fabaceae) | Mulungu | -0,6 ^{H*} -0,65 ^S | 40* | Ribeiro et al. (2019) |
| <i>Guibourtia hymenaefolia</i> (Moric.) J. Léonard (Fabaceae) | Copaíba | | 35* | Oliveira et al. (2014a) |
| <i>Handroanthus spongiosus</i> (Rizzini) S. Grose (Bignoniaceae) | Ipê-cascudo | -0,8 ^H -0,6 ^S | 45* | Ferreira et al. (2017) |
| <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. (Fabaceae) | Sabiá; sansão-do-campo; unha-de-gato | -0,8 ^H -1,1 ^{S*} | 35* | Sousa et al. (2018) Nogueira et al. (2013) |
| <i>Mimosa verrucosa</i> Benth. (Fabaceae) | Jurema-rosa | -0,8 ^H | 40* | Silva et al. (2010) Silva et al. (2011) Silva (2011) |
| <i>Myracrodruon urundeuva</i> All. (Anacardiaceae) | Aroeira; aroeira-do-sertão | -0,72 ^H ; -0,28 ^S | 41* | Oliveira et al. (2019) Dantas et al. (2020) |
| <i>Neoglaziovia variegata</i> Arruda Mez (Bromeliaceae) | Caroá | -0,8 ^H | 37* | Silveira et al. (2011) |
| <i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub. (Fabaceae) | Canafistula | -1,4 ^H | 35* | Pereira et al. (2013) Botelho e Perez (2001) |
| <i>Piptadenia moniliformis</i> Benth (Fabaceae) | Angico-de-bezerro | -1,2 ^H -1,0 ^{S*} | 35* | Azeredo et al. (2016) Pereira et al. (2016) |
| <i>Cenostigma pyramidale</i> Tul. (Fabaceae) | Catingueira-verdadeira | -0,8 ^H -1,06 ^S | 45 | Dantas et al. (2020) |
| <i>Cenostigma microphyllum</i> Tul. (Fabaceae) | Catingueira-rasteira | -1,8 ^S | 55,4 | Gomes et al. (2019) |
| <i>Senna spectabilis</i> (DC.) H.S. Irwin & Barneby (Fabaceae) | Canafistula; cássia-do-nordeste | -0,74 ^H | | Lima et al. (2018) |

Continua...

Tabela 1. Continuação.

| Espécie (família) | Nome comum | Potencial osmótico base ⁽¹⁾ (MPa) | Temperatura teto ⁽²⁾ (°C) | Autor |
|---|----------------------|--|--------------------------------------|--|
| <i>Bauhinia cheilantha</i> (Bong Stend.) (Fabaceae) | Mororó; pata-de-vaca | -0,5 ^H | 35* | Sanine (2006) Oliveira et al. (2014b) |
| <i>Sideroxylon obtusifolium</i> (Roem & Schult.) (Sapotaceae) | Quixabeira; quixaba | | 35* | Silva et al. (2014) |
| <i>Zephyranthes sylvatica</i> (Mart.) Baker (Amarilidaceae) | Lírio-da-caatinga | -0,8 ^{*H} -0,3 ^{*S} | 35* | Silva et al. (2014) |
| <i>Zizyphus joazeiro</i> Mart. (Rhamnaceae) | Juazeiro | -0,6 ^{*H} -0,6 ^{*S} | | Lima e Torres (2009) |
| <i>Schinopsis brasiliensis</i> (Engel.) (Fabaceae) | Braúna; baraúna | -0,4 ^H | 35* | Oliveira et al. (2014c) Silva et al. (2009) |

⁽¹⁾Potencial osmótico base é aquele abaixo do qual as sementes não conseguem germinar. H: restrição hídrica devido à utilização de soluções osmóticas de polietilenoglicol 6000; S: restrição hídrica devido à utilização de soluções salinas de cloreto de sódio (NaCl). Obs.: o polietilenoglicol 6000 é um composto quimicamente inerte e não tóxico, que reduz o potencial osmótico da solução e é utilizado para simular condições de déficit hídrico. *: máximo valor avaliado com germinação de sementes, sendo necessários estudos com valores mais restritivos para verificar o limite da tolerância. ⁽²⁾Temperatura teto é aquela acima da qual as sementes não germinam.

seca, juazeiro (*Zizyphus joazeiro* Mart.), produz sementes sensíveis à restrição hídrica, apresentando baixa porcentagem de germinação (20%) em -0,3 MPa e limite osmótico em -6 MPa (Lima; Torres, 2009).

Entre vários trabalhos que descrevem a resposta de sementes da Caatinga existentes na literatura (Tabela 1), o potencial osmótico -0,8 MPa parece ser um limite entre as sementes mais tolerantes (que germinam bem nessa condição) e moderadamente tolerantes e sensíveis (que germinam pouco ou não germinam nessa condição). Ainda neste capítulo relacionaremos como essa informação, obtida em laboratório com utilização de uma solução osmótica, pode ser usada para estimar as respostas em condições de campo.

Altas temperaturas

Assim como a água, a temperatura é um fator ambiental determinante para o desenvolvimen-

to e germinação das sementes. A temperatura influencia tanto a velocidade da germinação como o percentual final de sementes germinadas (Bewley et al., 2013). Além disso, esse elemento climático pode interferir no metabolismo das sementes, alterando os processos bioquímicos ou fisiológicos com respostas espécie-específicas. Por exemplo, as altas temperaturas durante a maturação podem reduzir o nível de dormência de algumas espécies (Baskin; Baskin, 2014), induzir termotolerância em outras (Sung et al., 1998) e reduzir peso e qualidade de sementes (Pádua et al., 2009).

Essa variação também pode ser observada em sementes de plantas nativas da Caatinga, entretanto as espécies desse ecossistema são naturalmente tolerantes às altas temperaturas, com a germinação ocorrendo sob amplo limite térmico (Dantas et al., 2020). Diferentes espécies da Caatinga, como *A. colubrina* (Dantas et al., 2020); *M. urundeuva* (Oliveira et al., 2019);

Schinopsis brasiliensis (Oliveira et al., 2014c); *C. pyramidale* (Dantas et al., 2020); *Bauhinia cheilantha* e *Amburana cearensis* (Silva et al., 2009); *P. dubium* (Pereira et al., 2013) e *Guibourtia hymenaefolia* (Oliveira et al., 2014a), possuem temperatura ótima de germinação entre 30 °C e 35 °C, indicando que essas espécies germinam em temperaturas pouco toleradas por aquelas que ocorrem em outros ambientes, como florestas úmidas (Meiado et al., 2012).

A temperatura ideal para a germinação de sementes de espécies tropicais gira em torno de 30 °C (Piña-Rodrigues et al., 2015). Estudos recentes afirmam que a temperatura ótima de germinação de algumas espécies da Caatinga variam entre aproximadamente 35 °C e 38 °C (Araujo, 2017; Gomes et al., 2019; Oliveira et al., 2019; Dantas et al., 2020). Mesmo em temperaturas consideradas extremas (>35 °C) para algumas espécies de regiões temperadas, a germinação das sementes da Caatinga é eficiente nesta temperatura. Como exemplo, podemos citar a espécie *C. pyramidale*, cujas sementes apresentam germinação próxima a 100% em até 35 °C (Matias, 2019) e *A. colubrina*, que apresenta 40% de germinação em 45 °C (Bispo, 2016). Sementes de *M. urundeuva* e *A. cearensis* produzem mais de 60% de plântulas normais a 35 °C. Essa mesma temperatura, no entanto, reduz a germinação de baráúna (*S. brasiliensis*), que produz menos de 20% de plântulas normais nessas condições, e é limitante para germinação de sementes de quixabeira (*Sideroxylon obtusifolium*) (Oliveira et al., 2014b).

Embora as condições edafoclimáticas da região em que as sementes se desenvolvem seja um fator essencial para a aquisição de termotolerância (Sung et al., 1998), essa condição não garante que todas as espécies daquele meio apresentem alta germinação em temperaturas extremas (Oliveira et al., 2014b). Assim, a resposta germinativa à temperatura em sementes de diversas espécies (*P. dubium*, *M. urundeuva*, *A. colubrina*, *C. pyramidale*) pode variar entre diferentes lotes, safras, populações e procedências (Oliveira et al., 2008; Matias, 2019; Oliveira et al., 2019; Gomes, 2019).

Além das condições naturalmente presentes na Caatinga, às quais as espécies já estão adaptadas, o aquecimento da região em média 3,5 °C, chegando a 4,8 °C (Base..., 2013), cria uma nova condição para o crescimento e desenvolvimento dessas espécies, bem como a produção e a qualidade de sementes.

Salinidade

A escassez de chuvas, as elevadas taxas de evaporação e o consequente déficit hídrico têm como resultado o aumento do conteúdo de sais solúveis no solo, que, em alguns casos, é potencializado pelas características hidrogeológicas (rochas do embasamento cristalino) que compõem a região semiárida do Nordeste brasileiro (Moro et al., 2016). Como comparação, cenários climáticos que preveem 30% de redução de precipitação e 10% de aumento na evapotranspiração poderão duplicar a salinidade do solo em uma região semiárida da Espanha (Aragüés et al., 2015). Além disso, a água utilizada na irrigação e/ou fertirrigação de cultivos locais pode desencadear um processo de salinização do solo e da água subterrânea, caso o manejo e drenagem sejam inadequados (Lima et al., 2008).

O excesso de sais solúveis provoca uma redução do potencial hídrico do solo, reduzindo a capacidade de absorção de água pelas sementes durante o processo de embebição (Nasr et al., 2012; Dantas et al., 2014). Além disso, o incremento na concentração salina produz um aumento na porcentagem de plântulas anormais, em virtude da ação tóxica dos sais sobre as sementes (Harter et al., 2014).

A resistência à salinidade é descrita como a habilidade das plantas de evitar, por meio de uma regulação salina, que excessivas quantidades de sal provenientes do substrato alcancem o protoplasma; e também de ter maior tolerância aos efeitos tóxicos e osmóticos associados ao aumento da concentração de sais (Passioura, 1986; Seal; Dantas, 2020). Essa adaptação das plantas ao estresse vem sendo avaliada pela

capacidade germinativa das sementes e pela análise de crescimento de plântulas (Conus et al., 2009).

A salinidade de águas e solos tem sido frequentemente relacionada com a condutividade elétrica, por ser um método de determinação prático e rápido, porém a apresentação e a interpretação de respostas da planta à salinidade, em termos de potencial osmótico, é mais adequada haja vista que possibilita diferenciar entre os efeitos tóxicos e osmóticos da salinidade (Coelho et al., 2014). Além disso, o potencial osmótico das plantas se deve ao fato de essa variável ser considerada o principal componente do potencial hídrico em ambientes salinos (Ben-Gal et al., 2009). A relação entre essas duas variáveis é linear e negativa sendo calculada por: potencial osmótico (MPa) = $-0,036 \times$ condutividade elétrica (dS m^{-1}) (Rowell, 1994). Embora a Tabela 1 apresente apenas o potencial osmótico para comparação entre os estresses hídrico e salino, neste texto utilizaremos as duas variáveis (potencial osmótico e condutividade elétrica) para descrever os limites de tolerância das espécies mencionadas.

As sementes da Caatinga em geral têm alta tolerância à salinidade (Tabela 1). Isso significa que as sementes das plantas desse bioma são capazes de germinar e produzir plantas jovens mesmo em solo salinizado ou sendo irrigadas com água salobra (Souza et al., 2010; Ribeiro et al., 2014; Dantas et al., 2019). As leguminosas *A. colubrina*, *C. pyramidale* e catingueira-rasteira (*Cenostigma microphyllum*) germinam em potenciais osmóticos mais baixos em soluções salinas (maior restrição hídrica) que em soluções de polietileno glicol (Tabela 1). A germinação dessas espécies ocorre em condutividades elétricas maiores que 30 dS m^{-1} ($\approx -1 \text{ MPa}$) (Gomes et al., 2019; Dantas et al., 2020), enquanto outras espécies florestais da Caatinga, como *M. urundeuva* e *B. cheilantha*, não germinam em 14 dS m^{-1} ($\approx -0,5 \text{ MPa}$) (Oliveira et al., 2014b).

Em estudo recente, foi observado que sementes de *M. urundeuva* têm limite de tolerância à salinidade de $-0,28 \text{ MPa}$ ($\approx 7,8 \text{ dSm}^{-1}$), um dos mais baixos entre aqueles verificados para as

espécies florestais da Caatinga. Ainda assim, as plântulas dessa espécie se desenvolvem em água salobra com até $6,8 \text{ dS m}^{-1}$ (Dantas et al., 2014). Essa informação levou a estudos recentes que indicaram a possibilidade de produção de mudas com reúso de água salobra (Ribeiro et al., 2014; Dantas et al., 2019), para assim subsidiar programas de restauração ecológica na Caatinga.

Germinação de espécies florestais da Caatinga em cenários climáticos futuros

Embora as sementes das espécies da Caatinga tenham demonstrado alta tolerância aos estresses abióticos, ainda se conhece pouco os limites a partir dos quais as sementes param de germinar. Também é desconhecida, para muitas espécies, a diferença existente entre diferentes progênies e/ou procedências dentro e fora do bioma Caatinga em relação a esses limites de tolerância. Além disso, são escassas as informações sobre como essas sementes responderão aos cenários climáticos previstos em relatórios recentes do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (em inglês Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) ou do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) para a região.

Assim, com o intuito de se prever a germinação em clima futuro, foram obtidos os limites térmicos, hídrico e salino de quatro espécies arbóreo-arbustivas da Caatinga (*M. urundeuva*, *C. pyramidale*, *C. microphyllum* e *A. colubrina*). Verificou-se que os limites térmicos para germinação de sementes dessas espécies, coletadas em região de Caatinga, foram semelhantes entre si. A temperatura base (T_b), abaixo da qual as sementes não germinam, foi sempre menor do que $12 \text{ }^\circ\text{C}$. Historicamente, esta é a temperatura mais baixa já registrada no sertão pernambucano, onde as sementes foram coletadas. A temperatura teto (T_c), acima da qual as sementes não germinam, foi sempre maior do que $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

A temperatura ótima (T_o), em que as sementes apresentam maior velocidade e porcentagem de germinação, variou em torno da faixa de 30 °C a 35 °C. Verificou-se, portanto, que o aumento da temperatura média da Caatinga em 2100 em até 4,8 °C, de acordo com o quinto relatório do IPCC – AR5/IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013), não prejudicaria o processo germinativo das espécies estudadas (Figura 1) (Gomes et al., 2019; Oliveira et al., 2019; Dantas et al., 2020). Por outro lado, em experimentos para avaliação de bancos de sementes, o aumento da temperatura do ambiente em aproximadamente 4,5 °C reduziu a densidade (quantidade) de sementes de espécies herbáceas germinadas, sem alterar a riqueza de espécies (quantidade de espécies diferentes) de plântulas (Figura 2) (Alencar et al., 2018; Araujo et al., 2018).

Embora as estimativas dos cenários climáticos sejam baseadas em mudanças na temperatu-

ra do ar, a temperatura do solo também afeta a germinação e persistência das sementes no banco de sementes do solo (Ooi et al., 2009). Esses efeitos dependem das características físicas do solo, cobertura vegetal e composição de espécies (Harte et al., 1995). Ooi et al. (2009) sugerem que a temperatura na superfície, nos primeiros centímetros de profundidade do solo, em regiões áridas da Austrália, pode ser em 50% mais alta que a temperatura do ar. Por outro lado, os solos mais calcários da Espanha e Eslováquia mantêm, a 5 cm, temperaturas mais amenas que as temperaturas do ar tanto no verão quanto no inverno, aumentando a resiliência de sementes às mudanças climáticas (Fernández-Pascual et al., 2015). Em experimento na Caatinga, a temperatura do solo a 2 cm de profundidade, onde se encontra a maioria dos propágulos do banco de sementes, apresentou aumento de 16% em relação à temperatura do ar (Dantas et al., 2020).

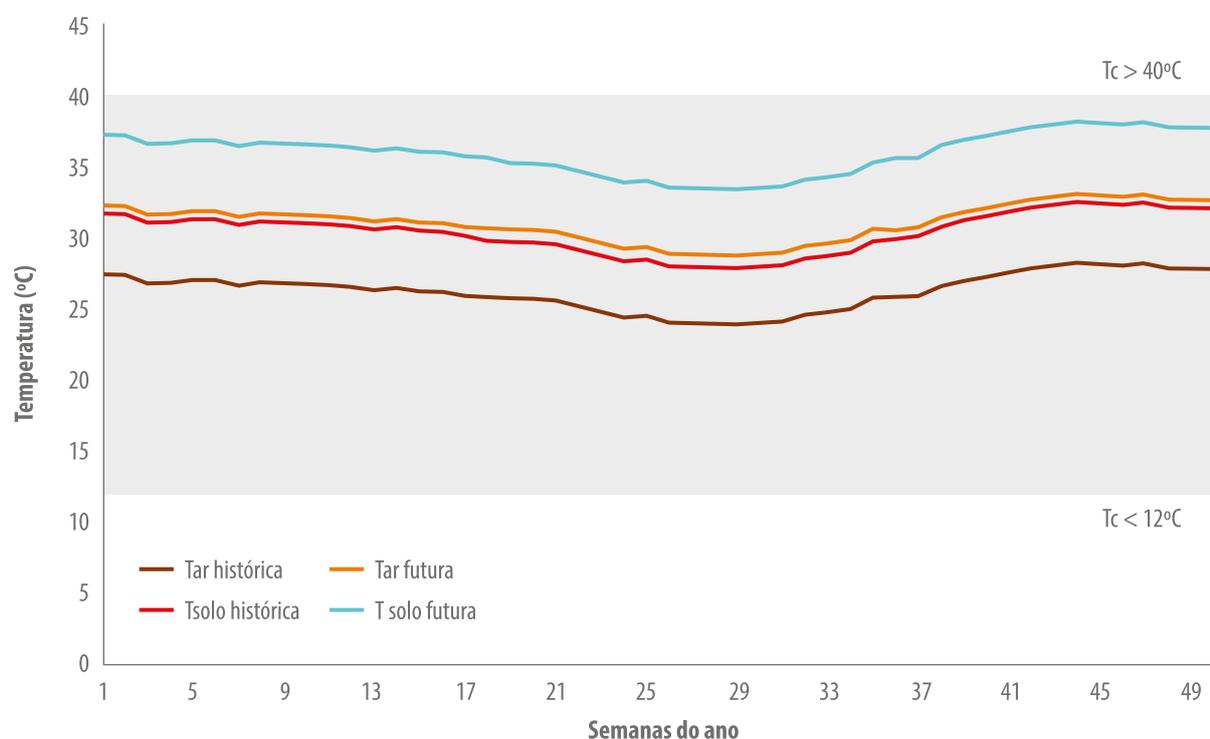


Figura 1. Intervalo térmico para germinação das sementes da Caatinga em clima atual e futuro (área cinza).

Tar histórica: temperatura média do ar de acordo com série histórica de 1970–2014. Tar futura: temperatura média do ar de acordo com estimativa de aumento de 4,8 °C até 2100. T solo histórica e T solo futura: temperatura do solo a 2 cm de profundidade, estimada em 16% mais alta que a Tar histórica e Tar futura, respectivamente. Tb: temperatura base, abaixo da qual sementes não conseguem germinar. Tc: temperatura teto, acima da qual sementes não conseguem germinar.

Fonte: Adaptado de Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) e Dantas et al. (2020).

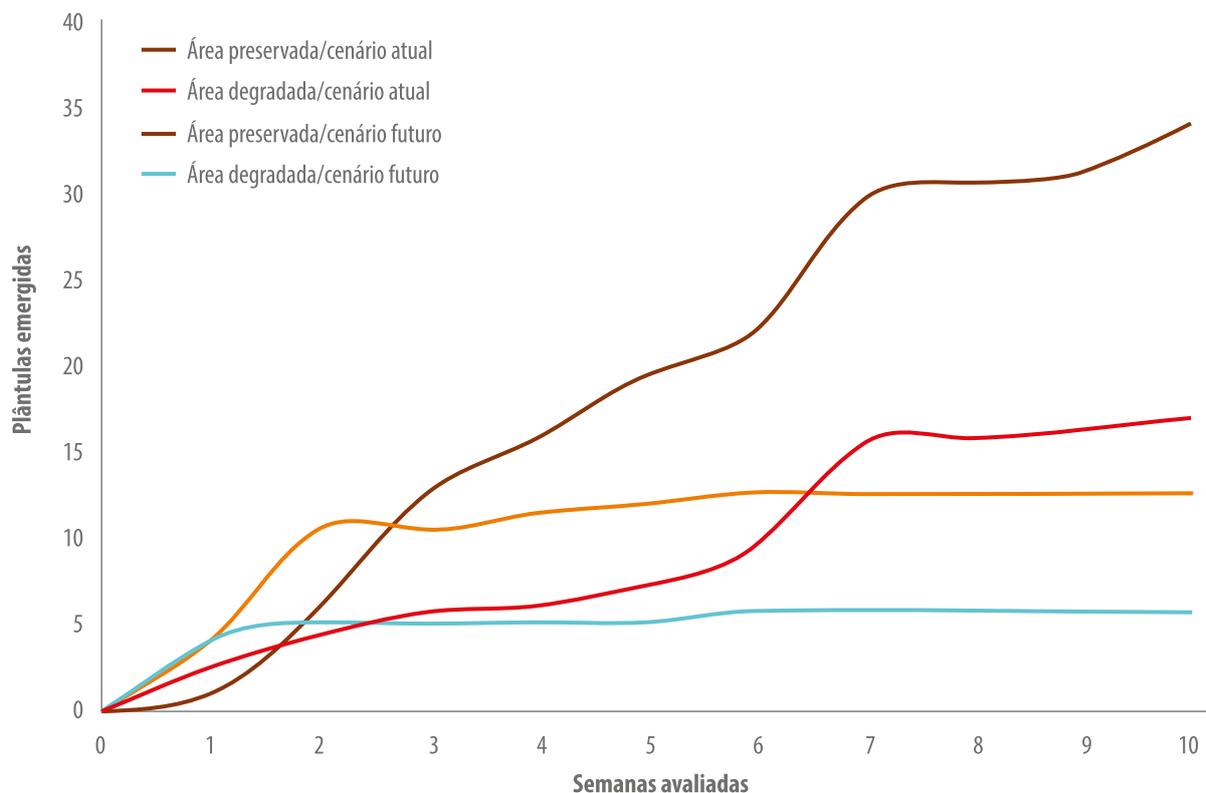


Figura 2. Emergência de plântulas de banco de sementes coletados em área preservada e degradada da Caatinga avaliadas em casas de vegetação de temperatura média do ar de 27 °C e de 32,5 °C, representando temperatura média atual e estimativa de aumento de 4,8 °C até 2100.

Fonte: Adaptado de Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) e Alencar et al. (2018).

Uma das consequências do aumento da temperatura e da evapotranspiração e da redução e má distribuição de chuvas, ocasionados pelas mudanças climáticas, é a salinização dos solos. Em cenários climáticos pessimistas, com 30% de redução do volume de chuvas (como previsto para o Semiárido nordestino) e 10% de aumento na evapotranspiração, estima-se que a salinidade do solo seja duplicada (Base..., 2013; Aragués et al., 2015).

A salinização do solo, por sua vez, é um dos problemas que mais contribui para degradação dos solos das regiões susceptíveis à desertificação (Amezketá, 2006). O potencial efeito das mudanças climáticas sobre a salinidade de reservatórios e açudes pode variar. Em anos secos, a estimativa de aumento da salinidade será na ordem de 2 dS m⁻¹ a 6 dS m⁻¹ entre os anos atuais e o final do século, podendo essa simulação ser mais agravante com períodos de estiagens mais

frequentes que os das séries históricas e atingir de 10 dS m⁻¹ a 16 dS m⁻¹ (Gondim et al., 2010).

A salinidade de solos da região da Caatinga pode variar conforme o uso da terra. A condutividade elétrica de solos de Caatinga preservada é de até 2 dS m⁻¹ (solo sem salinidade), enquanto áreas de agricultura irrigada com águas salobras apresentam até quase 12 dS m⁻¹ (solo altamente salinizado) e áreas degradadas com solos expostos apresentam até aproximadamente 36 dS m⁻¹ (solo extremamente salinizado) (Castro; Santos, 2019).

A tolerância à salinidade foi bastante alta para todas as espécies da Caatinga, se apresentando quase sempre maior que 20 dS m⁻¹ (≈ -0,7 MPa), podendo chegar a mais de 30 dS m⁻¹ (≈ -1 MPa) (Tabela 1). Além das sementes, mudas de espécies da Caatinga apresentam tolerância à salinidade da água de irrigação (Ribeiro et al., 2014;

Dantas et al., 2019), aumentando as chances de estabelecimento da nova planta no solo.

No que se refere à disponibilidade hídrica, o potencial osmótico base (ψ_b), aquele abaixo do qual as sementes não conseguem germinar, variou em torno de -0.8 MPa e foi sempre maior que -1,0 MPa, equivalente a 13,9% de umidade em solos da região onde as sementes foram colhidas (Nascimento et al., 2010). A partir da umidade mínima no solo (13,9%) para germinação das sementes e de trabalhos na literatura (Santos et al., 2011; Moura et al., 2015), foi calculada a precipitação mínima (17,5 mm) necessária em uma semana, para as sementes germinarem na Caatinga (Figura 3).

De acordo com os cenários mais pessimistas de clima futuro, o número de semanas com tempo térmico ($28\text{ }^{\circ}\text{C dia}^{-1}$ a $45\text{ }^{\circ}\text{C dia}^{-1}$) e precipitação (17,5 mm) necessários para germinação das sementes de algumas espécies da Caatinga

(*M. urundeuva*, *C. pyramidale*, *C. microphyllum* e *A. colubrina*) diminuirá de 14 (dados históricos de 1970–2014) para 4 semanas em 2100 (Figura 3; Gomes et al., 2019; Dantas et al., 2020).

Verificando-se a tolerância das sementes da Caatinga às altas temperaturas e às temperaturas atuais e previstas na região da Caatinga (Tabela 1), estima-se que esta não será restritiva à germinação das sementes nativas. No entanto, não se sabe ainda, para quais espécies, esse período de quatro semanas de precipitações maiores que 17,5 mm (previsto para 2100) será suficiente para que as sementes germinem e se desenvolvam adequadamente em plantas jovens tolerantes à estação seca.

A irrigação com 10 mm semanais permitiu a germinação de sementes e ainda o crescimento adequado de suas mudas de *A. colubrina*, em experimentos de vaso em casa de vegetação durante 14 semanas (Gomes, 2019). Além desse

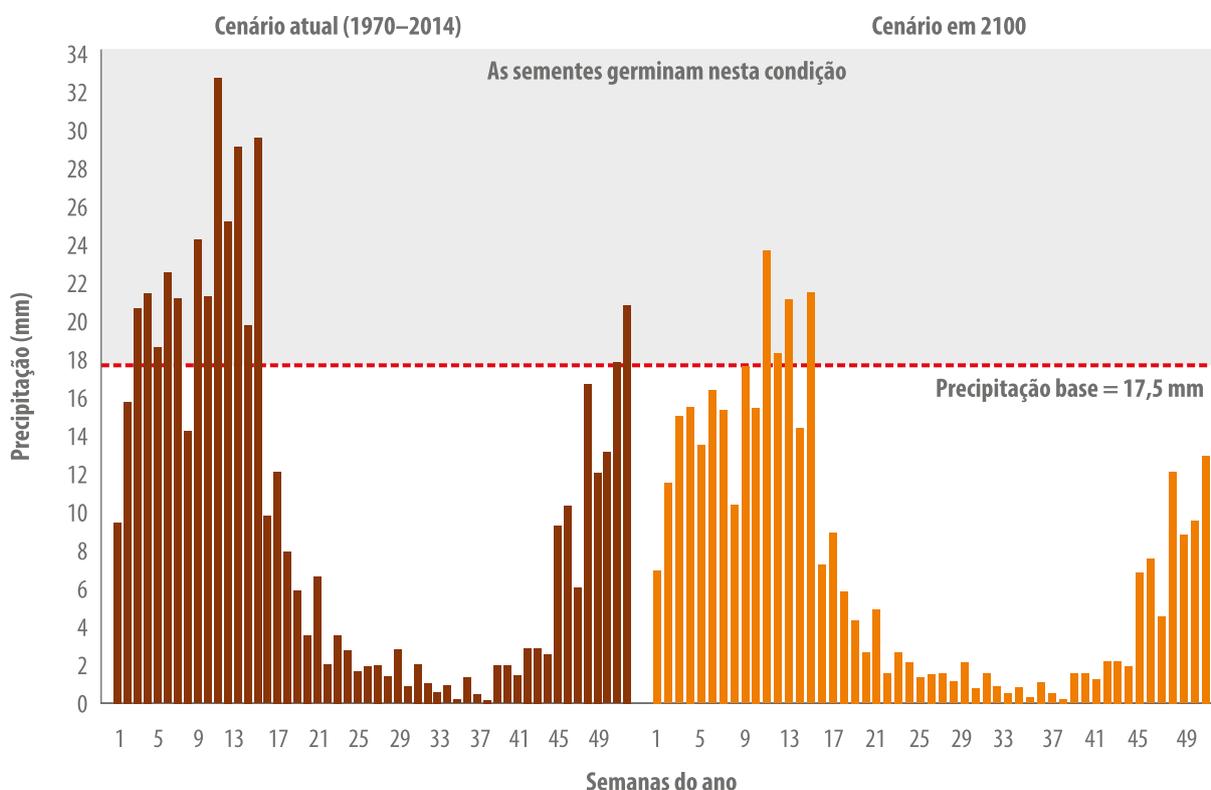


Figura 3. Intervalo hídrico de germinação das sementes da Caatinga (área cinza) em clima atual (série histórica de 1970–2014) e futuro (30% de redução do volume de precipitação até 2100).

Precipitação base: requerimento mínimo de precipitação em uma semana para germinação e estabelecimento de plântula.

Fonte: Adaptado de Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) e Dantas et al. (2020).

resultado, alguns estudos preliminares também têm dado indicativos da resposta das espécies florestais frente a esse cenário de mudanças climáticas. Após a germinação, plântulas de *C. pyramidale* e *A. colubrina*, com radículas de até 5 mm e 10 mm, apresentaram tolerância à dessecação pós-germinativa durante 72 horas, retomando seu crescimento após a reidratação (Figura 4) (Silva et al., 2017b) e, após a emergência, em bancos de sementes, plântulas *C. pyramidale* sobreviveram 40 dias sem chuva ou irrigação (Figura 5) (Silva et al., 2017a).

Fotos: Fabrício Francisco Santos Silva

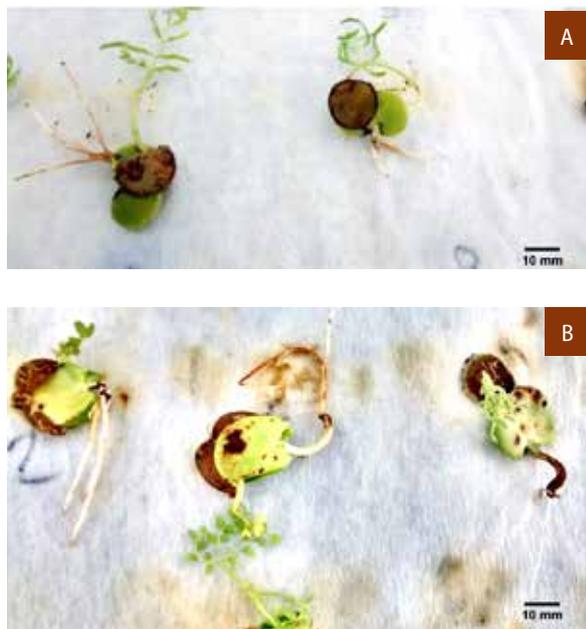


Figura 4. Plântulas de *Anadenanthera colubrina* (A) e *Poincianella pyramidalis* (B) emitindo raízes secundárias após 24 horas de dessecação pós-germinativa.

Foto: Bárbara França Dantas



Figura 5. Plântulas de *Cenostigma pyramidale* após 40 dias sem chuva, evidenciando a variabilidade na tolerância dessa espécie à deficiência hídrica.

Em razão da precipitação irregular e de temperaturas elevadas, mesmo durante a estação chuvosa, as sementes que são produzidas nos ambientes semiáridos, como a Caatinga, passam por ciclos de hidratação e desidratação no local onde vão germinar, o que influencia diretamente o seu comportamento germinativo (Dubrovsky, 1998). Ao passar pela hidratação descontínua, alguns benefícios são observados durante o processo germinativo de sementes da Caatinga, como aumento da porcentagem e velocidade de germinação, maior tolerância de sementes e plântulas aos estresses ambientais e alterando limites especificados na Tabela 1 (Lima; Meiado, 2018a, 2018b; Lima et al., 2018).

Ao reunir essas informações, verifica-se que eventos de baixa precipitação (< 5 mm) se tornam importantes para o recrutamento e desenvolvimento das plantas adaptadas ao ambiente semiárido (Sala; Lauenroth, 1982), podendo induzir ciclos de hidratação e secagem, e consequentemente maior tolerância das sementes aos estresses ambientais (Lima et al., 2018).

Considerações finais

Com as mudanças climáticas, novas combinações nos padrões de precipitação, temperatura, bem como em suas variações dentro e entre os diferentes ecossistemas poderão ocorrer. Isso afetará o desenvolvimento das plantas, desde a germinação das sementes até o seu crescimento e estabelecimento no ambiente. Além disso, as alterações na temperatura e na precipitação poderão influenciar diretamente a produção de sementes, prejudicando os processos de maturação e desenvolvimento e, consequentemente, diminuindo a qualidade, o tamanho, a quantidade e o vigor. Assim, os estudos sobre as relações do clima com a produção de sementes serão importantes para elucidar as características das sementes que podem permitir sua germinação, como para prever respostas de sementes e plântulas no campo e assim entender o recrutamento e a regeneração de todo o ecossistema.

Os resultados de pesquisa relatados neste capítulo indicam a alta capacidade de tolerância e adaptabilidade das sementes da Caatinga aos estresses abióticos. Contudo, são necessários avanços no mapeamento de populações vulneráveis às mudanças do clima e a promoção de ações para a conservação eficiente das espécies nativas da Caatinga.

Referências

- AFFONSO, I. B.; MATIAS, J. R.; GOMES, S. E. V.; COSTA, D. C. C. da; OLIVEIRA, G. M. de; BISPO, J. de S.; RIBEIRO, R. C.; DANTAS, B. F. Germinação de sementes de pereiro submetidas à restrição hídrica In: SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 4., 2015, Petrolina. **Experiências e oportunidades para o desenvolvimento**: anais. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2015. 1 CD-ROM. (Embrapa Semiárido. Documentos, 262).
- AGROMETEOROLOGIA. Embrapa Semiárido, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/semiárido/laboratorios/agrometeorologia>. Acesso em: 3 ago. 2020.
- ALENCAR, S. de S.; FREIRE, J. N. T.; GOMES, R. A.; PORTO, D. D.; DANTAS, B. F. Impacto do aumento da temperatura na germinação do banco de sementes do solo de Caatinga preservada e degradada. **Informativo Abrates**, v. 28, n. 2, p. 232, nov. 2018.
- ALMEIDA, J. P. N.; PINHEIRO, C. L.; LESSA, B. F. T.; GOMES, F. M.; MEDEIROS FILHO, S. Water stress and seed weight at germination and seedling growth in *Amburana cearensis* (Allemão) A.C. Smith. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 4, p. 777-787, 2014. DOI: [10.1590/S1806-66902014000400016](https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000400016).
- AMEZKETA, E. An integrated methodology for assessing soil salinization, a pre-condition for land desertification. **Journal of Arid Environments**, v. 67, n. 4, p. 594-606, Dec. 2006. DOI: [10.1016/j.jaridenv.2006.03.010](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.03.010).
- ANGELOTTI, F.; FERNANDES-JÚNIOR, P. I.; SÁ, I. B. Mudanças climáticas no Semiárido brasileiro: medidas de mitigação e adaptação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, p. 1097-1111, 2011. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/58274/1/Fran-2011.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2020
- ANTUNES, C. G. C.; PELACANI, C. R.; RIBEIRO, R. C.; SOUZA, J. V. DE; SOUZA, C. L. M. DE; CASTRO, R. D. DE. Germinação de sementes de *Caesalpinia pyramidalis* Tul. (catingueira) submetidas a deficiência hídrica. **Revista Árvore**, v. 35, n. 5, p. 1007-1015, out. 2011. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/488/48819945006.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ARAGÜÉS, R.; MEDINA, E. T.; ZRIBI, W.; CLAVERÍA, I.; ÁLVARO-FUENTES, J.; FACI, J. Soil salinization as a threat to the sustainability of deficit irrigation under present and expected climate change scenarios. **Irrigation Science**, v. 33, p. 67-79, 2015. DOI: [10.1007/s00271-014-0449-x](https://doi.org/10.1007/s00271-014-0449-x).
- ARAUJO, M. N. **Physiological aspects of germination and storage of *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm (Fabaceae) seeds**. 2017. 78 f. Tese (Doutorado em Recursos Genéticos Vegetais) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA.
- ARAUJO, R. G.; ALENCAR, S. de S.; FREIRE, J. N. T.; PEREIRA, M. C. T.; DANTAS, B. F. Efeito da temperatura na germinação do banco de sementes de macrófitas aquáticas do Semiárido. In: SIMPÓSIO DO BIOMA CAATINGA, 2., 2018, Petrolina. **Anais [...]** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2019. p. 305. (Embrapa Semiárido. Documentos, 287).
- AZERÊDO, G. A. de; PAULA, R. C. de; VALERI, S. V. Germinação de sementes de *Piptadenia moniliformis* Benth. SOB estresse hídrico. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 193-202, jan./mar. 2016. DOI: [10.5902/1980509821112](https://doi.org/10.5902/1980509821112).
- BASE científica das mudanças climáticas: Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo GT1. Rio de Janeiro, 2013. DOI: [10.13140/RG.2.1.1641.6883](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1641.6883).
- BASKIN, C. C.; BASKIN, J. M. **Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination**. 2nd San Diego: Elsevier, 2014.
- BEN-GAL, A.; H, YERMIYAHU, U.; SHANI, U. Is osmotic potential a more appropriate property than electrical conductivity for evaluating whole-plant response to salinity? **Environmental and Experimental Botany**, v. 65, n. 2-3, p. 232-237, Mar. 2009. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2008.09.006](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.09.006).
- BEWLEY, J. D.; BRADFORD, K. J.; HILHORST, H. W. M.; NONOGAKI, H. **Seeds: Physiology of development, germination and dormancy**. 3rd Edition. New York: Springer, 2013.
- BISPO, J. S. **Biometria, vigor e limites para a germinação de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan**. 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado em Horticultura Irrigada) – Universidade do Estado da Bahia, Juazeiro, BA.
- BISPO, J. S.; COSTA, D. C. C. da; GOMES, S. E. V.; OLIVEIRA, G. M. de; MATIAS, J. R.; RIBEIRO, R. C.; DANTAS, B. F. Size and vigor of *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan seeds harvested in Caatinga areas. **Journal of Seed Science**, v. 39, n. 4, p. 363-373, Oct./Dec. 2017. DOI: [10.1590/2317-1545v39n4173727](https://doi.org/10.1590/2317-1545v39n4173727).
- BOTELHO, B.; PEREZ, S. Growth regulators and water stress in canafistula seed germination. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 1, p. 43-49, Jan./Mar. 2001. DOI: [10.1590/S0103-90162001000100008](https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000100008).

- BROWN, J. H.; VALONE, T. J.; CURTIN, C. G. Reorganization of an arid ecosystem in response to recent climate change. **Proceedings of the National Academic Science**, v. 94, n. 18, p. 9729-9733, Sept. 1997. DOI: [10.1073/pnas.94.18.9729](https://doi.org/10.1073/pnas.94.18.9729).
- BUCKERIDGE, M. S.; AIDAR, M. P. M.; MARTINEZ, C. A.; SILVA, E. A. Respostas de plantas às mudanças climáticas globais. In: BUCKERIDGE, M. S. (org.). **Biologia das mudanças climáticas no Brasil**. São Carlos: São Carlos: Rima, 2008. p. 77-92.
- CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. Salinidade do solo e risco de desertificação na região semiárida. **Mercator**, v. 19, e19002, Mar. 2019. DOI: [10.4215/rm2020.e19002](https://doi.org/10.4215/rm2020.e19002).
- COELHO, J. B. M.; BARROS, M. F. C.; BEZERRA NETO, E.; SOUZA, E. R. Ponto de murcha permanente fisiológico e potencial osmótico de feijão caupi cultivado em solos salinizados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 7, p. 708-713, July 2014. DOI: [10.1590/S1415-4366201400070000](https://doi.org/10.1590/S1415-4366201400070000).
- CONUS, L. A.; CARDOSO, P. C.; VENTUROSO, L. DOS R.; SCALON, S. de P. Q. Germinação de sementes e vigor de plântulas de milho submetidas ao estresse salino induzido por diferentes saís. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 4, p. 67-74, 2009. DOI: [10.1590/S0101-31222009000400008](https://doi.org/10.1590/S0101-31222009000400008).
- DANTAS, B. F.; MOURA, M. S. B. de; PELACANI, C. R.; ANGELOTTI, F.; TAURA, T. A.; OLIVEIRA, G. M.; BISPO, J. S.; MATIAS, J. R.; SILVA, F. F. S.; PRITCHARD, H. W.; SEAL, C. E. Rainfall, not soil temperature, will limit the seed germination of dry forest species with climate change. **Oecologia**, v. 192, p. 529-541, 2020. DOI: [10.1007/s00442-019-04575-x](https://doi.org/10.1007/s00442-019-04575-x).
- DANTAS, B. F.; RIBEIRO, R. C.; MATIAS, J. R.; ARAÚJO, G. G. L. Germinative metabolism of Caatinga forest species in biosaline agriculture. **Journal of Seed Science**, v. 36, n. 2, p. 194-203, Apr./June 2014. DOI: [10.1590/2317-1545v32n2927](https://doi.org/10.1590/2317-1545v32n2927).
- DANTAS, B. F.; RIBEIRO, R. C.; OLIVEIRA, D. M. de; SILVA, F. F. S. da; ARAUJO, G. G. L. de. Biosaline production of seedlings of native species from the Caatinga dry forest. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 4, p. 1551-1567, out./dez. 2019.
- DUBROVSKY, J. G. Discontinuous hydration as a facultative requirement for seed germination in two cactusspecies of the Sonoran Desert. **Journal of the Torrey Botanical Society**, v. 125, p. 33-39, May 1998. DOI: [10.2307/2997229](https://doi.org/10.2307/2997229).
- FERNÁNDEZ-PASCUAL, E.; JIMÉNEZ-ALFARO, B.; HÁJEK, M.; DÍAZ, T.; PRITCHARD, H. W. Soil thermal bufer and regeneration niche may favour calcareous fen resilience to climate change. **Folia Geobotanica**, v. 50, p. 293-301, 2015. DOI: [10.1007/s12224-015-9223-y](https://doi.org/10.1007/s12224-015-9223-y).
- FERREIRA, J. V. A.; MEIADO, M. V.; SIQUEIRA FILHO, J. A. de. Efeito dos estresses hídrico, salino e térmico na germinação de sementes de *Handroanthus spongiosus* (Rizzini) S. Grose (Bignoniaceae). **Gaia Scientia**, v. 11, n. 4, 2017. DOI: [10.22478/ufpb.1981-1268.2017v11n4.35470](https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2017v11n4.35470).
- FLORA do Brasil 2020 em construção. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.floradobrasil.jbrj.gov.br>. Acesso em: 29 jul. 2020
- GOMES, S. E. V.; ARAÚJO, M. N.; DANTAS, B. F. Efeito da precipitação e temperatura no tamanho de sementes de *Anadenanthera colubrina*. In: JORNADA DE INTEGRAÇÃO DA PÓS-GRADUAÇÃO DA EMBRAPA SEMIÁRIDO, 2., 2017, Petrolina. **Anais [...]** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2017.
- GOMES, S. E. V. **Clima e tamanho de sementes de angico (*Anadenanthera colubrina* var. *cebil* (Griseb.) Altschu)**: influência na produção de sementes, qualidade fisiológica e tolerância aos estresses abióticos. 2019. 83 f. Dissertação (Mestrado em Horticultura Irrigada) – Universidade do Estado da Bahia, Juazeiro, BA.
- GOMES, S. E. V.; OLIVERA, G. M. de; ARAÚJO, M. do N.; SEAL, C. E.; DANTAS, B. F. Influence of current and future climate on the seed germination of *Cenostigma microphyllum* (Mart. ex G. Don) E. Gagnon & G. P. Lewis. **Folia Geobotanica**, v. 54, p. 19-28, Oct. 2019. DOI: [10.1007/s12224-019-09353-4](https://doi.org/10.1007/s12224-019-09353-4).
- GONDIM, T. M. S.; CAVALCANTE, L. F.; BELTRAO, N. E. M. Aquecimento global: salinidade e consequências no comportamento vegetal. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, v. 14, n. 1, p. 37-54, jan./abr. 2010.
- HARTE, J.; TORN, M. S.; CHANG, F. R.; FEIFAREK, B.; KINZIG, A. P.; SHAW, R.; SHEN, K. Global warming and soil microclimate: Results from a meadow-warming experiment. **Ecological Applications**, v. 5, n. 1, p. 132-50 Feb, 1995.
- HARTER, L. S. H.; HARTE, F. S.; DEUNER, C.; MENEGHELLO, G. E.; VILLELA, F. A. Salinidade e desempenho fisiológico de sementes e plântulas de mogango. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 1, p. 80-85, 2014. DOI: [10.1590/S0102-05362014000100013](https://doi.org/10.1590/S0102-05362014000100013).
- INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2013: The physical science basis**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013. Working Group I Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report.
- KRANNER, I.; MINIBAYEVA, F. V.; BECKETT, R. P.; SEAL, C. E. What is stress? Concepts, definitions and applications in seed science. **New Phytologist**, v. 188, n. 3, p. 655-73, Sept. 2010. DOI: [10.1111/j.1469-8137.2010.03461.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03461.x).
- LIMA, A. T.; CUNHA, P. H. J. DA; DANTAS, B. F.; MEIADO, M. V. Does discontinuous hydration of *Senna spectabilis* (DC.) HS Irwin & Barneby var. *excelsa* (Schrad.) (Fabaceae) seeds confer tolerance to water stress during seed germination? **Journal of Seed Science**, v. 40, n. 1, 2018.
- LIMA, A. T.; MEIADO, M. V. Effect of hydration and dehydration cycles on *Mimosa tenuiflora* seeds during germination and initial development. **South African**

- Journal of Botany**, v. 116, n. 1, p. 164-167, May 2018a. Doi: 10.1016/j.sajb.2018.03.017.
- LIMA, A. T.; MEIADO, M. V. Effects of seed hydration memory on initial growth under water deficit of cactus from two populations that occur in different ecosystems in Northeast Brazil. **Plant Species Biology**, v. 33, p. 1-10, 2018b. DOI: 10.1111/1442-1984.12219.
- LIMA, B. G.; TORRES, S. B. Estresses hídrico e salino na germinação de sementes de *Zizyphus joazeiro* Mart. (Rhamnaceae). **Revista Caatinga**, v. 22, n. 4, p. 93-99, out./dez. 2009.
- LIMA, E. A.; NASCIMENTO, D. A.; GUILERA, S. C.; BRANDÃO, L. C. R. Mapa de variação da concentração total de sais das águas subterrâneas da Região Nordeste do Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 22, n. 2, p. 1-13, 20 set. 2008.
- LÚCIO, A. A.; SILVA, F. F. S. da; RIBEIRO, L. S.; DANTAS, B. F.; KIILL, L. H. P. Comportamento fisiológico de sementes de umburana-de-cheiro (*Amburana cearensis* All. (Leguminosae)) submetidas a diferentes temperaturas de germinação. In: SEMINÁRIO PANAMERICANO DE SEMENTES, 20., 2006, Fortaleza, CE. **Resumos** [...] Brasília, DF: Associação Brasileira de Sementes e Mudanças - ABRASEM, 2006. 1 CD-ROM.
- MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2. ed. Londrina: Abrates, 2015.
- MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanálise**, v. 3, n. 1, p. 49-54, 2016.
- MATIAS, J. R. **Vulnerabilidade de sementes de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) aos estresses abióticos**. 2019. 68 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal Rural do SemiÁrido, Mossoró.
- MEIADO, M. V.; SILVA, F. F. S.; BARBOSA, D. C. de A. Diaspores of the Caatinga: A Review. In: SIQUEIRA FILHO, J. A. de (ed.). **Flora of the Caatingas of the São Francisco River: Natural History and Conservation**. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio Editorial, 2012. p. 306-365.
- MORO, M. F.; NIC LUGHADHA, E.; ARAÚJO, F. S.; MARTINS, F. R. A phytogeographical metaanalysis of the semiarid caatinga domain in Brazil. **Botanical Review**, v. 82, p. 91-148. 2016. DOI: 10.1007/s12229-016-9164-z.
- MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B.; RANDOW, C. V.; SILVA, T. G. F. da. Perfil vertical de CO₂ na Caatinga preservada: resultados preliminares. Agrometeorologia no século 21: o desafio sustentável dos biomas brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11., 2015, Lavras. **Anais** [...] Lavras: Ufla, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/131730/1/artigo-1.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2020.
- NASCIMENTO, P. S.; BASSOI, L. H.; PAZ, V. P. da S.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. de M.; MANIERI, J. M. Estudo comparativo de métodos para a determinação da curva de retenção de água no solo. **Irriga**, v. 15, n. 2, p. 193-207, 2010. DOI: 10.15809/irriga.2010v15n2p193.
- NASR, S. M. H.; PARSAKHO, A.; NAGHAVI, H.; KOOHI, S. K. S. Effect of salt stress on germination and seedling growth of *Prosopis juliflora* (Sw.). **New Forests**, v. 43, n. 1, p. 45-55, 27 jan. 2012. DOI: 10.1007/s11056-011-9265-9.
- NOGUEIRA, N. W.; RIBEIRO, M. C. C. de; FREITAS, R. M. O.; GURGEL, G. B.; NASCIMENTO, I. L. do. Diferentes temperaturas e substratos para germinação de sementes de *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. **Revista de Ciências Agrárias – Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 2, p. 95-98, 2013.
- OLIVEIRA, A. K. M.; PEREIRA, K. C. L. Efeito de diferentes temperaturas na germinação e crescimento radicular de sementes de jatobá-mirim (*Guibourtia hymenaeifolia* (Moric.) J. Léonard). **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 111-116. 2014a. DOI: 10.5902/1980509813328.
- OLIVEIRA, G. M. de; MATIAS, J. R.; SILVA, P. P. da; RIBEIRO, R. C.; DANTAS, B. F. Germinação de sementes de aroeira-do-sertão (*Myracrodruon urundeuva* Fr. All.) e mororó (*Bauhinia cheilantha* (Bong) Stend.) em diferentes condutividades elétricas. **Revista SODEBRAS**, v. 9, n. 104, p. 115-122, ago. 2014b.
- OLIVEIRA, G. M.; RODRIGUES, J. M.; RIBEIRO, R. C.; BARBOSA, L. G.; SILVA, J. E. S. B.; DANTAS, B. F. Germinação de sementes de espécies arbóreas nativas da Caatinga em diferentes temperaturas. **Scientia Plena**, v. 10, n. 4, p. 1-6, 2014c.
- OLIVEIRA, G. M.; SILVA, F. F. S.; ARAÚJO, M. N.; COSTA, D. C. C.; GOMES, S. E. V.; MATIAS, J. R.; ANGELOTTI, F.; PELACANI, C. R.; SEAL, C. R.; DANTAS, B. F. Environmental stress, future climate, and germination of *Myracrodruon urundeuva* seeds. **Journal of Seed Science**, v. 41, p. 32-43, Já./Mar. 2019. DOI: 10.1590/2317-1545v41n1191945.
- OLIVEIRA, L. M.; DAVIDE, A. C.; CARVALHO, M. L. M. Teste de germinação de sementes de *Peltophorum dubium* (Sprengel) Taubert – Fabaceae. **Floresta**, v. 38, n. 3, p. 545-551, 2008. DOI: 10.5380/rf.v38i3.12425.
- OOI, M. K. J.; AULD, T. D.; DENHAM, A. J. Climate change and bet-hedging: interactions between increased soil temperatures and seed bank persistence. **Global Change Biology**, v. 15, p. 2375-2386, Sept. 2009. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01887.
- PÁDUA, G. P.; FRANCA NETO, J. B.; CARVALHO, M. L. M.; KRZYŻANOWSKI, F. C.; GUIMARÃES, R. M. Incidence of green soybean seeds as a function of environmental stresses during seed maturation. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 3, p. 150-159, set. 2009. DOI: 10.1590/S0101-31222009000300017.
- PASSIOURA, J. B. Resistance to drought and salinity: avenues for improvement. **Functional Plant Biology**, v. 13, n. 1, p. 191-201. 1986. DOI: 10.1071/PP986019.
- PASSOS, M. A.; CRUZ. Estado da arte da produção e tecnologia de sementes florestais no nordeste. In: PIÑA-RODRIGUES, F. C. M.; FIGLIOSA, M. B.; SILVA, A. (ed.).

- Sementes florestais tropicais:** da ecologia à produção. 2. ed. Londrina: Abrates, 2015. p. 400-420.
- PEREIRA, F. E. C. B.; MEDEIROS FILHO, S.; TORRES, S. B.; MARTINS, C. C.; BRITO, S. F. Saline stress and temperatures on germination and vigor of *Piptadenia moniliformis* Benth. seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 7, p. 649-653, July 2016. DOI: [10.1590/1807-1929/agriambi.v20n7p649-653](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n7p649-653).
- PEREIRA, S. R.; KALIFE, C.; RODRIGUES, A. P.; LAURA V. A. Influência da temperatura na germinação de sementes de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. **Informativo Abrates**, v. 23, n. 3, p. 52-5, 2013.
- PEREZ, S. C. J. G. D. A.; FANTI, S. C.; CASALI, C. A. Influência da luz na germinação de sementes de canafístula submetidas ao estresse hídrico. **Bragantia**, v. 60, p. 155-166, 2001.
- PIÑA-RODRIGUES, F. C. M.; FIGLIOLIA, M. B.; SILVA, A. **Sementes florestais tropicais:** da ecologia à produção. 2. ed. Londrina: Abrates, 2015. 477 p.
- REGO, S. S.; FERREIRA, M. M.; NOGUEIRA, A. C.; GROSSI, F.; SOUSA, R. K. de; BRONDANI, G. E.; SILVA, A. L. L. da. Estresse hídrico e salino na germinação de sementes de *Anadenanthera colubrina* (Velloso) Brenan. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 2, n. 4, p. 37-42, 2011.
- RIBEIRO, R. C.; DANTAS, B. F.; MATIAS, J. R.; OLIVEIRA, G. M. de; CAROLINA, D.; BISPO, J. D. S. Germinação de sementes e produção de mudas de catingueira-verdadeira em água bioessalina. **Informativo ABRATES**, v. 24, n. 3, p. 51-55, 2014.
- RIBEIRO, R. C.; DANTAS, B. F.; PELACANI, C. R. Aspectos fisiológicos e bioquímicos de sementes de *Erythrina velutina* Willd. na tolerância aos estresses abióticos durante a germinação e crescimento inicial de plântulas. In: SILVA-MANN, R.; RABBANI, A. R. C.; GOMES, L. J. (org.). **Pensado a biodiversidade:** Mulungu (*Erythrina* sp.). Salvador: EDIFBA, 2019. p. 15-47.
- ROWELL, D. L. **Soil science:** methods and applications. Harlow: Longman, 1994. 781p.
- SALA, O. E.; LAUENROTH, W. K. Small rainfall events: An ecological role in semiarid regions. **Oecologia**, v. 53, p. 301-304. 1982. DOI: [10.1007/BF00389004](https://doi.org/10.1007/BF00389004).
- SANINE, M. S. **Estudos de alguns aspectos de germinação e bioquímicos de sementes de *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud., sob diferentes condições de armazenamento.** 2006. 59 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas (Botânica) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- SANTOS, R. S.; MATIAS, J. R.; RIBEIRO, R. C.; DANTAS, B. F. Influência do estresse térmico no processo germinativo de sementes de pereiro. In: WORKSHOP DE SEMENTES E MUDAS DA CAATINGA, 4., 2012, Petrolina. **Anais** [...] Petrolina: Embrapa Semiárido, 2014. p. 105-110. (Embrapa Semiárido. Documentos, 258).
- SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 7, p. 670-679, July 2011. DOI: [10.1590/S1415-43662011000700004](https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000700004).
- SEAL, C. E. Assessing the vulnerability of species to climate change. **Samara**, n. 22, p. 6, 2012.
- SEAL, C. E.; DANTAS, B. F. Seed functional traits of halophytes. In: GRIGORE, M. N. **Handbook of halophytes. from molecules to ecosystems towards biosaline agriculture.** New York: Springer. 2020.
- SILVA, F. F. S.; OLIVEIRA, G. M. de; ARAÚJO, M. N.; PELACANI, C. R.; DANTAS, B. F. Sobrevivência de plântulas de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan à dessecação. In: JORNADA DE INTEGRAÇÃO DA PÓS-GRADUAÇÃO DA EMBRAPA SEMIÁRIDO, 2., 2017, Petrolina. **Anais** [...] Petrolina: Embrapa Semiárido, 2017b. p. 15-21. (Embrapa Semiárido. Documento, 280).
- SILVA, F. F. S.; OLIVEIRA, G. M.; ARAÚJO, M. N.; ANGELOTTI, F.; MOURA, M. S. B.; DANTAS, B. F. Rainfall events, high CO₂ concentration, and germination of seeds in Caatinga. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 3, p. 256-265, 2017a.
- SILVA, M. B. R. da; VIÉGAS, R. A.; NETO, J. D.; FARIAS, S. A. R. Estresse salino em plantas da espécie florestal sabiá. **Caminhos de Geografia**, v. 10, n. 30, p. 120-127, Jun 2009.
- SILVA, M. W.; BARBOSA, L. G.; SILVA, J. E. S. B. da; GUIRRA, K. S.; GAMA, D. R. da S.; OLIVEIRA, G. M. de; DANTAS, B. F. Characterization of seed germination of *Zephyranthes sylvatica* (Mart.) Baker (Amarilidaceae). **Journal of Seed Science**, v. 36, n. 2, p. 178-185, 2014. DOI: [10.1590/2317-1545v32n2923](https://doi.org/10.1590/2317-1545v32n2923).
- SILVA, P. P. da; SOUZA, C. L. M.; SOUZA, M. O.; PELACANI, C. R.; DANTAS, B. F. Efeito de diferentes temperaturas na germinação de sementes de *Mimosa verrucosa* Benth. (Leguminosae - Mimosaceae) nativas do Nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RECURSOS GENÉTICOS; WORKSHOP EM BIOPROSPECÇÃO E CONSERVAÇÃO DE PLANTAS NATIVAS DO SEMI-ÁRIDO, 3.; WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE BIOENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2010, Salvador. **Bancos de germoplasma:** descobrir a riqueza, garantir o futuro: anais. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2010. 1 CD-ROM. (Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Documentos, 304).
- SILVA, P. P. **Germinação e armazenamento de sementes de *Mimosa verrucosa* Benth. nativa da Caatinga.** 2011. 53 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Genéticos Vegetais) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA.
- SILVA, P. P.; LOPES, A. P.; ARAÚJO, M. N.; LIRA, M. A. P.; OLIVEIRA, D. A. B.; SILVA, F. F. S.; REIS, R. C. R.; SOUZA, Y. A.; DANTAS, B. F. Germinação de sementes de *Schinopsis brasiliensis* submetidas a estresse hídrico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FIOLOGIA VEGETAL, 12.,

2009, Fortaleza. **Desafios para produção de alimentos e bioenergia**: anais. Fortaleza: SBFV: UFC: Embrapa Agroindústria Tropical, 2009. 1 CD-ROM.

SILVA, P. P.; SOUZA, C. L. M.; ANTUNES, C. G. C.; CRUZ, C. R. P.; DANTAS, B. F.; Efeito da restrição hídrica sobre a germinação de *Mimosa verrucosa* Benth. (Leguminosae - Mimosaceae). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FISILOGIA VEGETAL, 13., 2011, Buzios. **Anais [...]** Buzios: Ed. da UENF, 2011.

SILVEIRA D. G.; PELACANI C. R.; ANTUNES C. G.; ROSA S. S.; SOUZA F. V.; SANTANA J. R. Resposta germinativa de sementes de caroá [*Neoglaziovia variegata* (Arruda) Mez]. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 5, p. 948-55, out. 2011. DOI: [10.1590/S1413-70542011000500012](https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000500012).

SOUSA, E. C.; SILVA, D. V.; SOUSA, D. M. M.; TORRES, S. B.; OLIVEIRA, R. R. T. Physiological changes in *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. seeds from different sources and submitted to abiotic stresses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 383-389, 2018. DOI: [10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p383-389](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p383-389).

SOUZA, Y. A.; PEREIRA, A. L.; SILVA, F. F. S. da; REIS, R. C. R.; EVANGELISTA, M. R. V.; CASTRO, R. D. de; DANTAS, B.

F. Efeito da salinidade na germinação de sementes e no crescimento inicial de mudas de pinhão-mansão. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 2, p. 83-92, June 2010. DOI: [10.1590/S0101-31222010000200010](https://doi.org/10.1590/S0101-31222010000200010).

SUNG, Y.; CANTLIFFE, D. J.; NAGATA, R. T. Seed developmental temperature regulation of thermotolerance in lettuce. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 123, n. 4, p. 700-705, July 1998. DOI: [10.21273/JASHS.123.4.700](https://doi.org/10.21273/JASHS.123.4.700).

TEIXEIRA, A. H. de C. **Informações agrometeorológicas do Polo Petrolina, PE/Juazeiro, BA - 1963 a 2009**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. 21 p. (Embrapa Semiárido. Documentos, 233).

THUILLER, W.; LAVOREL, S.; ARAÚJO, M. B.; SYKES, M. T.; PRENTICE, I. C. Climate change threats to plant diversity in Europe. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 102, n. 23, p. 8245-50, June 2005. DOI: [10.1073/pnas.0409902102](https://doi.org/10.1073/pnas.0409902102).

WALCK, J. L.; HIDAYATI, S. N.; DIXON, K. W.; THOMPSON, K.; POSCHLOD, P. Climate change and plant regeneration from seed. **Global Change Biology**, v. 17, n. 6, p. 2145-2161. 2011. DOI: [10.1590/2317-1545v32n2923](https://doi.org/10.1590/2317-1545v32n2923).

Biotecnologia para a geração de plantas tolerantes à seca em um cenário de mudanças climáticas

Carolina Vianna Morgante

Introdução

A comunidade científica e a sociedade, de modo geral, têm como desafio transformar a agricultura, conciliando segurança alimentar e nutricional, sustentabilidade de ecossistemas, crescimento econômico e igualdade social. Os caminhos para o desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável requerem a geração constante de conhecimento e inovações e, sobretudo, a garantia de acesso a novas tecnologias a todos os envolvidos na cadeia agrícola, do pequeno ao grande produtor.

Esses desafios intensificam-se quando são consideradas as crescentes demandas por alimentos e os impactos das mudanças climáticas nos sistemas agrícolas e vice e versa. A agricultura, a silvicultura e outros usos da terra são responsáveis pela emissão antropogênica de aproximadamente 20% dos gases de efeito estufa (GEE), constituindo o setor com a maior emissão de GEE que não o dióxido de carbono (CO₂). As atividades agrícolas, por exemplo, são responsáveis por aproximadamente dois terços das emissões de óxido nitroso (NO₂), principalmente por causa da aplicação de fertilizantes minerais e adubo orgânico como o esterco (Jia, 2019). Por outro lado, a agricultura é altamente sensível aos efeitos das mudanças climáticas que levam, sobretudo, à alteração da fenologia de plantas, dispersão incontrolada de patógenos e redução da fertilidade dos solos, fatores esses que causam significativa redução da produtividade.

Modelos de simulação indicam que o aumento de temperatura pode causar perda de produtividade de grão e biomassa em milho na ordem de 4% a 7% por elevação de 1 °C, como consequência da redução do ciclo de crescimento, pela maturação precoce das flores, e diminuição da fixação de CO₂ (Bassu et al., 2014). Em soja, apesar de os modelos indicarem um aumento de produtividade em razão do aumento do CO₂ atmosférico no final do século XXI, esse efeito pode ser diminuído ou até anulado, considerando-se as previsões de aumento de temperatura e escassez de recurso hídrico (Cera et al., 2017). Outros modelos apontam para um crescimento acentuado da taxa de desenvolvimento de importantes pragas em regiões tropicais, como a broca-do-café (*Hypothenemus hampei*). Uma vez que o crescimento populacional de *H. hampei* está exponencialmente relacionado à temperatura atmosférica, um aumento na faixa de 15 °C a 27 °C pode influenciar profundamente a dinâmica populacional dessa praga (Jaramillo et al., 2009).

A vulnerabilidade dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas é acentuada pelas atuais práticas utilizadas que priorizam o uso de fertilizantes sintéticos nitrogenados, o uso não eficiente de recursos naturais, como solo e água, e a baixa diversidade de culturas agrícolas. Nesse cenário, um dos focos das pesquisas científicas é o desenvolvimento de culturas resilientes ao clima, capazes de crescer sob uma ampla faixa de condições climáticas e apresentar rápida adaptação às mudanças ambientais, mantendo a produtividade (Dhankher; Foyer, 2018). Para esse desafio, torna-se essencial o conhecimento

sobre a distribuição da variabilidade genética, seu significado adaptativo, bem como sua interação com o ambiente (Mousavi-Derazmahalleh et al., 2019). A biotecnologia aparece como peça-chave nesse desafio, proporcionando ferramentas que intensificam e agilizam a exploração da biodiversidade e seu uso no melhoramento de plantas. Neste capítulo serão abordadas as diversas fontes de variabilidade genética úteis ao melhoramento, métodos para sua prospecção e geração de novas variantes genéticas, visando à obtenção de plantas mais tolerantes à seca, frente a um cenário de mudanças climáticas.

Fontes de variação genética na busca pela tolerância à seca

Cerca de 7 mil espécies vegetais foram cultivadas para consumo durante a história da humanidade (FAO, 2018). Muitas delas são hoje utilizadas em atividades agrícolas, seja para consumo humano e animal, seja como fontes medicinais, energéticas, ornamentais, entre outras aplicações. No entanto, atualmente, somente aproximadamente 30 culturas fornecem cerca de 95% da energia consumida na alimentação humana. Destas, apenas quatro (arroz, trigo, milho e batata) compreendem 60% do suprimento energético da alimentação humana mundial (FAO, 2018).

Uma característica comum à maioria das plantas domesticadas é a redução da diversidade genética, sobretudo de genes que influenciam fenótipos desejáveis, durante e após o processo de domesticação, uma vez que este foi iniciado com um número limitado de progenitores e, ao longo das gerações, houve uma forte seleção artificial para características alvo, como produtividade, palatabilidade e modo de dispersão das sementes. Estima-se que o milho contém apenas 57% da variabilidade observada em seu progenitor e que de 2% a 4% de seus genes sofreram seleção durante o processo de domesti-

cação e melhoramento, muitos deles envolvidos em vias de crescimento, resposta a auxina e biossíntese de aminoácidos (Wright et al., 2005). Já em trigo, análises fundamentadas em marcadores moleculares revelaram que a transição entre a forma silvestre e domesticada foi marcada por uma forte redução da diversidade de nucleotídeos e polimorfismos de sequências. A diversidade inicial foi perdida em 69% em *Triticum aestivum* L., o trigo para pão, e em 84% em *Triticum durum* Desf., o trigo duro usado na produção de massas (Haudry et al., 2007).

A combinação de alelos superiores nas variedades modernas, focada na eficiência produtiva de sistemas de cultivo intensivos, restringe a capacidade dessas plantas em se adaptarem a um cenário de mudança climática. Nesse contexto, germoplasmas exóticos, representados por parentes silvestres de espécies cultivadas, variedades locais e espécies nativas de ambientes extremos, podem ser considerados fontes de alelos úteis para o melhoramento moderno, tanto para a resistência a pragas e doenças, como para características associadas à tolerância a estresses abióticos (Charmet, 2011).

Dessa forma, programas de pré-melhoramento tornam-se essenciais para a ampliação da base genética e identificação de características relevantes em materiais exóticos, de forma a possibilitar a introgressão de genes de espécies silvestres, crioulas ou de materiais não adaptados em populações de melhoramento via cruzamentos assistidos ou via transferência intra e interespecífica de genes por transformação genética (Varshney et al., 2018).

Espécies silvestres parentes de espécies cultivadas originárias de habitats secos carregam alelos gênicos que conferem adaptação ao déficit hídrico, como consequência da evolução e da seleção natural, e que podem ser úteis em programas de melhoramento. No entanto, em algumas situações, os fatores que permitem a sobrevivência em ambientes secos não são compatíveis com a tolerância à seca em um contexto agrônômico, que visa à alta produção. Outras dificuldades esbarram na incompatibilidade de cruzamento entre as espécies cultiva-

da e silvestre e a introgressão de características negativas presentes na fonte silvestre nas cultivares elite (Blum, 2011). Apesar desses desafios, existem reportados diversos exemplos de sucesso do uso de espécies silvestres no melhoramento para a tolerância ao déficit hídrico, como os relatados a seguir.

Em arroz, o retrocruzamento entre *Oryza sativa* L., a espécie cultivada, e *Oryza rufipogon* Griff, um de seus progenitores silvestres, como parentes recorrente e doador, respectivamente, permitiu o desenvolvimento de linhagens de introgressão tolerantes à seca com alta capacidade de recuperação após um período de déficit hídrico e posterior reidratação. Essa tolerância foi associada ao acúmulo de prolina e açúcares solúveis em condição de seca. Essas linhagens de introgressão são ferramentas úteis para a identificação de genes e alelos favoráveis ao melhoramento e também para o entendimento dos mecanismos de resistência à seca em arroz (Zhang et al., 2014).

O potencial de espécies silvestres em contribuir com características adaptativas para o melhor desempenho de plantas cultivadas em ambientes com restrição hídrica foi também evidenciado em trigo (*T. aestivum*), a partir da introgressão em *T. aestivum* de segmentos cromossômicos (7DL) da espécie silvestre *Agropyron elongatum* (Host). Beauv. Essas linhagens de translocação (LTs) apresentaram aumento de biomassa de raízes e parte aérea e melhor aclimação ao déficit hídrico, em comparação ao genótipo convencional de trigo usado como controle. Além disso, a mudança na arquitetura de raízes das LTs, evidenciada pelo aumento de crescimento de raízes seminais e laterais, foi associada a uma resiliência fotossintética. Com o sistema radicular mais desenvolvido, essas LTs foram capazes de aumentar o acesso à água e manter níveis mais favoráveis de trocas gasosas e assimilação de CO₂ sob déficit hídrico, em comparação às plantas controle. É possível que a translocação de segmentos cromossômicos da espécie silvestre levou à introdução de novos genes relacionados ao desenvolvimento de raízes ou à reincorporação de alelos possi-

velmente perdidos durante o melhoramento e a intensa seleção em ambientes considerados ótimos ao crescimento da cultura (Placido et al., 2013).

Outro caso interessante foi reportado em plantas de amendoim, por meio da introgressão de alelos silvestres para o aumento da tolerância à seca. Uma cultivar elite de *Arachis hypogaea* L. ($2n = 4x = 40$), adaptada a regiões semiáridas brasileiras, foi cruzada com o alotetraploide sintético obtido do cruzamento entre as espécies silvestres *Arachis duranensis* Krapov. & W.C. Greg. e *Arachis batizocoi* (Krapov. & W.C. Greg.), ambas diploides ($2n = 2x = 20$), e posteriormente retrocruzada RC1F2. Foi possível a obtenção de linhagens avançadas com maiores taxas de transpiração e fotossíntese e elevada produtividade, em condições de restrição hídrica, em comparação ao parental recorrente. Essa é uma demonstração de que é possível superar a diferença de ploidia entre as espécies silvestres e cultivada para a introgressão de alelos que conferem vantagens adaptativas (Dutra et al., 2018).

É possível também domesticar espécies silvestres, por meio do domínio de seu sistema reprodutivo, métodos de propagação e melhoramento de características de interesse agrônomo e, dessa forma, contribuir diretamente para a diversificação de sistemas agrícolas. É o caso do maracujazeiro BRS Sertão Forte, desenvolvido por pesquisadores da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), por meio de seleção massal, visando ao aumento de produtividade e tamanho dos frutos, em uma população de acessos silvestres do maracujazeiro-silvestre (*Passiflora cincinnata* Mast.), nativo da Caatinga, popularmente conhecido como maracujá-do-mato. A cultivar obtida apresenta maior tolerância ao déficit hídrico e maior ciclo produtivo, quando comparada a cultivares de maracujazeiro-azedo (*Passiflora edulis* Sims). É recomendada para o plantio em regiões da Caatinga e Cerrado com limitações hídricas, onde é praticada a agricultura de sequeiro, sem exigência de alto uso tecnológico (Araújo et al., 2016).

Ainda como exemplo de seleção, caracterização de material silvestre e exploração de seu potencial agrônomo, pode-se citar o caso do umbuzeiro (*Spondias tuberosa*), árvore símbolo do bioma da Caatinga, com adaptações morfológicas e ecofisiológicas marcantes para a tolerância à seca. Pesquisadores da Embrapa Semiárido, por meio de coletas em regiões de ocorrência natural da espécie, formaram uma coleção (Banco Ativo de Germoplasma) com aproximadamente 75 genótipos. Dentre esses materiais, foram selecionadas árvores com frutos gigantes. O domínio da propagação vegetativa do umbuzeiro foi possível como resultado de intensas pesquisas focadas na superação de dormência de sementes, geração de mudas por enxertia e indução floral, de forma a antecipar o início da frutificação. Já foram produzidas mais de 10 mil mudas de árvores com frutos gigantes e distribuídas em unidades de observação em regiões semiáridas (Santos et al., 2005). Essas cultivares de umbu gigante estão registradas no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento com as denominações BRS 48, BRS 52, BRS 55 e BRS 68 (Brasil, 2019).

O uso de espécies silvestres e outros tipos de germoplasmas exóticos em programas de melhoramento é viabilizado pela existência de coleções de germoplasma para a conservação e manejo dos recursos genéticos, as quais têm um importante papel como grande provedor de variabilidade genética. A plataforma online Genesys reúne informações de bancos de germoplasma vegetal, incluindo espécies silvestres e cultivadas, de 459 instituições ao redor do mundo, totalizando o registro de cerca de 2,8 milhões de acessos, de forma a facilitar a rápida busca e o intercâmbio de materiais (Genesys, 2019). No Brasil, a Embrapa é a principal instituição responsável pela organização e manutenção dessas coleções, que são preservadas em campos experimentais, conservadas in vitro ou em bancos de sementes e de DNA. No caso de germoplasma vegetal, são conservados 123.615 acessos de 2.187 espécies (Embrapa, 2019). A Coleção de Base (Colbase), localizada na Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnolo-

gia (Cenargen), em Brasília, DF, criada em 1976, abriga 112.000 acessos de sementes de 800 espécies vegetais, sendo a maior da América Latina. Nessa coleção são também mantidos 1.500 acessos de plantas in vitro (Pádua, 2016). Apesar de existirem diversas iniciativas para a conservação da diversidade genética ao redor do mundo, a diversidade de espécies silvestre ainda tem pouca representatividade nas coleções de germoplasma (Castañeda-Álvarez et al., 2016).

Além do uso de parentais silvestres de espécies cultivadas para a identificação de alelos que conferem tolerância à seca, espécies nativas de ambientes extremos podem também ser valiosa fonte de diversidade. A compreensão dos mecanismos celulares e moleculares que fazem com que uma planta sobreviva a situações extremas de estresse pode levar ao isolamento dos fatores que condicionam essa característica e sua transferência a uma espécie cultivada. Um exemplo é o grupo formado por plantas tolerantes à dessecação (Figura 1). Essas plantas constituem recurso genético exótico para a tolerância à desidratação e chamam a atenção por terem a capacidade de tolerar e se restabelecer após a quase completa perda (95%) de água protoplasmática de seus tecidos vegetativos (Scott, 2000).

A tolerância à dessecação em plantas é um mecanismo comum em estruturas como pólen, esporos e sementes, porém, na fase vegetativa, é encontrado em um número restrito de plantas, mais frequentemente em clados menos complexos, como o de algas, líquens e briófitas. No entanto, essa característica também pode ser observada em plantas vasculares, exceto nas gimnospermas. No bioma da Caatinga, podem ser encontradas espécies tolerantes à dessecação, como a gramínea *Tripogonella spicata* (Nees) P.M.Peterson & Romasch e a pteridófito *Selaginella convoluta* (Arn.) Spring, popularmente conhecida como jericó. Entre as angiospermas, a tolerância à dessecação aparece em espécies de mono e dicotiledôneas, dispersas em pelo menos oito famílias (Oliver et al., 2000). A tolerância à dessecação nesse grupo de plan-



Figura 1. Plantas tolerantes à dessecação presentes no bioma da Caatinga, em estado hidratado e desidratado: *Selaginela convoluta* (A) e *Tripogonella spicata* (B).

tas não está associada à presença de estruturas morfoanatômicas, como cladódios, folhas suculentas ou túberas, apesar de estar restrita a plantas de pequeno porte. Essa tolerância é conferida por um ajuste metabólico, homólogo ao encontrado em sementes, e provavelmente originou-se por uma reprogramação da expressão dos genes envolvidos no processo (Farrant; Moore, 2011).

O potencial de plantas tolerantes à dessecação como doadoras de diversidade genética para o melhoramento foi evidenciado em trabalhos nos quais genes de plantas tolerantes à dessecação foram utilizados para a transformação genética de plantas modelos ou cultivadas, para a alteração da regulação de vias envolvidas com mecanismos celulares de sinalização e expressão gênica, de controle do estresse oxidativo e osmoproteção, visando à promoção da tolerância a estresses abióticos, conforme descrito a seguir.

Plantas transgênicas de arroz superexpressando um gene da gramínea tolerante à dessecação *Tripogon loliiformis* (F.Muell.), *TlOsm*, que codifica osmotina, proteína chave na mediação da resposta a estresses bióticos e abióticos via sinalização celular, apresentaram aumento da tolerância ao frio, seca e salinidade, em comparação a plantas não transformadas (NTs). Essa tolerância foi associada à habilidade das plantas transgênicas em manterem o cres-

cimento e desenvolvimento e conservarem maior quantidade de água foliar e integridade de membranas celulares, sob condição de estresse, o que levou a um aumento da biomassa seca e da capacidade de recuperação após alívio dos estresses, em plantas transgênicas, quando comparadas a NTs (Le et al., 2018).

Também envolvendo a regulação de mecanismos celulares, o fator de transcrição *BhbZIP60*, isolado da espécie tolerante à dessecação *Dorcoceras hygrometricum* Bunge, nativa de regiões rochosas do sudeste asiático, teve sua função confirmada na promoção da tolerância à seca na planta modelo para estudos de genética molecular, *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. Quando submetidas à suspensão da rega durante duas semanas, plantas superexpressando o gene *BhbZIP60* apresentaram maior atividade do fotossistema II, maior conteúdo de água foliar e maior teor de clorofila, em comparação a plantas NTs. Em plantas transgênicas, foi também detectada a expressão aumentada de genes relacionados às vias de sinalização de estresse no retículo endoplasmático, o que evidencia o papel de *BhbZIP60* na regulação da resposta a proteínas não enoveladas. Esse é um importante mecanismo celular para manutenção da homeostase celular em situações de estresse, pela inibição da tradução de proteínas, degradação de proteínas mal enoveladas e ativação de vias para o aumento da expressão

de chaperonas, proteínas envolvidas no enovelamento de proteínas (Wang et al., 2017).

Já em relação ao aumento da osmoproteção, a superexpressão dos genes que codificam proteínas LEA (*Late Embryogenesis Abundant*) do grupo 4, isolados de *D. hygrometricum*, conferiu tolerância à seca em plantas de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.). Esses genes são principalmente expressos em sementes, e as proteínas LEA acumulam-se durante o estágio de desenvolvimento embrionário tardio. No entanto, em resposta a estresses ambientais, as plantas também acumulam essas proteínas, as quais exercem funções variadas, incluindo a proteção de estruturas celulares contra os efeitos da perda de água, a proteção de proteínas contra danos induzidos por estresses, o sequestro de íons e proteção de atividades de enzimas, além de agirem como chaperonas. Plantas transgênicas superexpressando genes LEA exibiram, sob déficit hídrico, um retardo do aparecimento do sintoma de murcha, devido a uma maior capacidade de retenção do teor de água foliar. Nessas plantas, foram também detectadas, em comparação a plantas NTs, a prevenção do decréscimo da atividade do fotossistema II e da degradação de membranas celulares, a atividade aumentada de enzimas que sequestram espécies reativas de oxigênio (EROs) e a maior estabilização de proteínas que operam na fotossíntese, como a Rubisco (Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase) (Liu et al., 2009).

Explorando modificações no metabolismo antioxidativo, Mbinda et al. (2018) geraram plantas transgênicas de batata-doce [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] expressando o gene da enzima aldose redutase, isolada de *Xerophyta viscosa* Baker, uma monocotiledônea tolerante à dessecação nativa do sul da África. Essa enzima atua nas primeiras etapas do sistema de sequestro e eliminação de EROs geradas em condições de estresse. As plantas transgênicas exibiram aumento da tolerância ao déficit hídrico simulado e maior capacidade de recuperação pós-estresse, devido a um aumento da eficiência fotossintética, do conteúdo de água e de teores

de prolina sob desidratação, em comparação a plantas NTs.

Apesar da vasta biodiversidade encontrada em fontes de germoplasma exótico, que podem ser empregadas no melhoramento genético de plantas, seja por introgressão gênica ou domesticação de novas espécies, a diversificação de uso de culturas em sistemas agrícolas é a alternativa capaz de gerar respostas mais imediatas e amortizar perdas de produção, garantindo a segurança alimentar em um cenário de mudanças climáticas. A diversificação de culturas é vantajosa, uma vez que pode promover o aumento da resiliência, estimulando a habilidade de suprimir surtos de pragas e atenuar a transmissão de patógenos, contribuindo para o aumento da biodiversidade da microbiota dos solos, que tem grande importância na ciclagem de nutrientes e, conseqüentemente, na amortização dos efeitos negativos na produtividade, decorrentes de grandes variações climáticas (Lin, 2011).

Métodos moleculares para prospecção da biodiversidade visando à tolerância à seca

As estratégias das plantas para a adaptação ao estresse compreendem respostas coordenadas que regulam seu crescimento e desenvolvimento. Muitos esforços têm sido empregados na identificação e entendimento de vias celulares e moleculares relacionadas a esses processos para a identificação de genes estruturais e regulatórios com potencial envolvimento na adaptação às mudanças climáticas.

Os avanços continuados no aperfeiçoamento das tecnologias de sequenciamento de DNA, fenotipagem e de ferramentas de bioinformática para a análise de dados em grande escala aumentam, a cada dia, o poder de decifração dos componentes genéticos associados à resposta de plantas ao déficit hídrico.

Cerca de 225 plantas tiveram seu genoma completamente sequenciado. Dessas, aproximadamente 58% são cultivadas, a maioria utilizada para a alimentação humana, e 18% são progenitores silvestres de plantas cultivadas (Kew Royal Botanic Garden, 2017). Trata-se de um grande repositório de informações, muitas delas de livre acesso agrupadas em bancos de dados especializados, como o Phytozome (Goodstein et al., 2012), com possibilidades de uso diversificado, incluindo a elucidação das relações evolutivas entre as espécies vegetais, a identificação das vias metabólicas celulares e o mapeamento genético e seu uso no melhoramento assistido por marcadores moleculares. Dessa forma, ferramentas genômicas possuem o potencial de alcance de grandes ganhos de produtividade, uma vez que aceleram a taxa e precisão de melhoramento. É possível a rápida identificação de novos genes e alelos e incorporá-los de forma controlada, permitindo o acúmulo de múltiplas características superiores em um germoplasma elite (Kole et al., 2015).

A complementação dos estudos genômicos com dados de expressão gênica em larga escala é útil para o entendimento da dinâmica da interação genótipo x ambiente e permite a identificação de muitos genes responsivos ao déficit hídrico. Algumas dessas informações podem ser acessadas em bancos de dados como o Drought Stress Gene Database, onde cerca de 200 genes, de 38 espécies vegetais, envolvidos na adaptação fisiológica e molecular à seca, estão classificados em vias metabólicas nas quais atuam, permitindo uma visão ampla e sincronizada dos mecanismos fisiológicos e moleculares envolvidos na resposta ao estresse hídrico (Alter et al., 2015). O papel de micro RNAs (miRNAs) na regulação de vias relacionadas a estresses abióticos também vem sendo intensivamente explorado em diversas espécies, evidenciando o papel do controle epigenético na tolerância ao déficit hídrico. Em plantas de algodão submetidas ao déficit hídrico, foi demonstrado que um único miRNA pode regular a expressão de até 40 genes que atuam principalmente em vias relacionadas à interação planta-patógeno,

transdução de sinal hormonal e biossíntese de aminoácidos (Lu et al., 2019).

Tecnologias de sequenciamento de última geração foram empregadas, por exemplo, para a identificação de genes envolvidos na resposta à seca em espécies de *Arachis*, parentes silvestres do amendoim (*Arachis hypogaea* L.), que apresentam tolerância à seca. Por meio da análise do transcrito, foi possível a identificação de genes envolvidos na via de transdução de sinais, como fatores de transcrição da família NAC e bZIP, e genes envolvidos na proteção celular, como o que codifica uma metalotioneína, com função descrita no sequestro de EROs e desintoxicação de metais gerados em situações de estresse celular. Foi também identificada a superexpressão em situação de estresse hídrico do gene que codifica a proteína expansina-like B (EXLB), relacionada à indução do relaxamento da parede celular que ocorre tanto em processos do desenvolvimento vegetal, como na resposta adaptativa a estímulos mecânicos e ambientais (Brasileiro et al., 2015). Foi demonstrada a tendência ao aumento de expressão do gene EXLB em resposta ao déficit hídrico, em 13 genótipos, incluindo espécies silvestres e a cultivada do gênero *Arachis*. A superexpressão desse gene mostrou-se também eficiente na redução do número de galhas em raízes de soja infectadas pelo nematoide *Meloidogyne javanica* (Guimaraes et al., 2017).

Novas fontes de variabilidade para a tolerância à seca

O melhoramento genético pode ser alcançado por diferentes vias ou combinações destas, como o cruzamento entre genótipos selecionados, o melhoramento por mutação ou pela adição de novo material genético, resultando em um organismo geneticamente modificado.

A mutação é a fonte primária de toda a variação genética existente em um organismo. A existência de variabilidade em um pool gênico de

plantas cultivadas é um pré-requisito em programas de melhoramento. Essa variabilidade pode ter origem natural e ser identificada, caracterizada e introduzida em programas de melhoramento convencional. No entanto, mutações espontâneas são eventos raros e aleatórios, em termos de tempo de ocorrência e genes afetados. O avanço no desenvolvimento de ferramentas biotecnológicas, já no início do século XX, permitiu aos pesquisadores a criação de variabilidade genética útil ao melhoramento, por meio da indução artificial de mutações.

A mutagênese induzida em plantas teve seu início marcado com os trabalhos de Lewis John Stadler, que demonstrou a ação mutagênica de raios X em milho, cevada e trigo, no final dos anos 1920. Com o avanço das pesquisas, outros agentes mutagênicos foram identificados, de origem física, como a luz ultravioleta, raios gama, nêutrons e até a radiação cósmica, e de origem química, como os agentes alquilantes etilmetanosulfonato (EMS), metil-nitroso-ureia (MNU), etil-nitroso-ureia (ENU), dimetil sulfato, colchicina, entre outros que, em geral, produzem um grande número de mutações recessivas por substituição de uma única base do DNA. A primeira cultivar mutante liberada comercialmente foi de *N. tabacum*, nos anos 1930, na Índia, denominada Clorina, que consistia em uma planta aneuploide ($2n + 1$) com mutação que conferia à folha coloração verde-amarelada (Kharkwal, 2012). Desde então, muitos mutantes foram gerados, em diferentes culturas, para diversas características. Atualmente, existem 3.250 registros de variedades de plantas no banco de dados de mutantes (International Atomic Energy Agency, 2018). Nesse banco, de 1960 a 2017, foram registrados 108 mutantes tolerantes à seca, de 24 culturas, incluindo soja, milho e trigo, desenvolvidos em 20 países, o que destaca a universalidade e acessibilidade da técnica. Interessantemente, a maioria desses mutantes apresenta também outras características agronomicamente vantajosas, como aumento de produtividade, resistência a doenças, entre outras. Na Tabela 1 estão listadas

variedades mutantes de plantas registradas nos últimos dez anos.

Apesar de o método de mutagênese induzida ter seu sucesso comprovado ao longo dos anos e não possuir restrições regulatórias para a liberação de seus produtos no mercado consumidor, ainda enfrenta limitações como: a dificuldade em se identificar os poucos indivíduos com novos fenótipos em uma grande população submetida ao agente mutagênico; a redundância genética encontrada na maioria das plantas, em virtude de duplicações gênicas e poliploidia, que faz com que muitas mutações não apresentem efeitos detectáveis (Parry et al., 2009); e a incerteza da natureza das mutações que geram o novo fenótipo, sobretudo em espécies que não possuem genoma sequenciado.

A emergência e o avanço da genética molecular contribuíram para o entendimento de detalhes sobre a função gênica e o modo de ação e herdabilidade de mutações que condicionam características desejáveis. A tecnologia do DNA recombinante permitiu a combinação artificial de moléculas de DNA e a manipulação e clonagem gênicas, destacando-se como valiosa ferramenta para a alteração genética direcionada em diversos organismos. A transformação genética de plantas tem sido adotada como o método para o estudo de funções gênicas e também amplamente empregada para o uso biotecnológico, no melhoramento de plantas agrícolas via engenharia genética. Desde a produção da primeira planta transgênica ou geneticamente modificada (GM), um tabaco resistente a antibiótico (Bevan et al., 1983), e a primeira liberação comercial de uma planta transgênica, a do tomateiro Flavr Savr, com maior tempo de prateleira (Kramer; Redenbaugh, 1994), os métodos para obtenção de plantas transgênicas foram aperfeiçoados. Plantas GM tiveram suas aplicações diversificadas; seus riscos à saúde e ao meio ambiente vêm sendo constantemente monitorados; e a legislação para regulamentação de sua liberação e uso vem sendo alinhada aos progressos da biotecnologia, sendo específica para cada nação optante pelo uso de organismos GMs.

Atualmente, as culturas transgênicas, ou culturas biotecnológicas, são adotadas em 26 países e ocupam uma área de aproximadamente 190 milhões de hectares, com tendência a um crescimento anual médio de 3% (International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications, 2019). A tecnologia está disponível comercialmente para 31 culturas, incluindo espécies arbóreas, oleaginosas, leguminosas, grãos, frutíferas, olerícolas e ornamentais; no entanto há predominância no uso de culturas como a soja, milho e algodão, que compreendem 50%, 33% e 12% da área mundial plantada com culturas biotecnológicas, respectivamente. A lista de novas características introduzidas é extensa e diversa, incluindo resistência a insetos e doenças, tolerância a herbicidas, alteração do crescimento e produtividade, modificação da qualidade do produto, controle do sistema de polinização e tolerância a estresses abióticos. Para essa última característica, todos os eventos disponíveis conferem tolerância à seca, em três culturas diferentes, milho, soja e cana-de-açúcar, com transgenes de origem bacteriana e vegetal (Tabela 2).

O milho transgênico MON87460, aprovado para consumo em 18 países, incluindo o Brasil, e em países da União Europeia, foi transformado para a superexpressão do gene *BscspB*, que codifica a proteína de choque frio B de *Bacillus subtilis*, que age como uma chaperona na proteção de moléculas de RNA. Em testes conduzidos a campo, plantas transgênicas apresentaram produtividade em torno de 6% superior à do controle convencional (plantas não transformadas), sob condições limitantes de água, sendo que não foram observadas diferenças significativas entre os valores de produtividade dos dois genótipos sob irrigação plena. A superioridade do milho MON87460, em comparação ao controle, foi relacionada à sua maior capacidade de aclimação em ambiente de déficit hídrico, associada a uma redução transiente do crescimento foliar, diminuição do uso de água e consequente aumento da eficiência de uso de água, o que levou a um aumento do crescimento das espigas e grãos (Nemali et al., 2015).

Outra planta transgênica liberada comercialmente apresentando tolerância à seca é o evento de soja Verdeca HB4, com superexpressão do fator de transcrição *Hahb-4* isolado de girassol. Plantas superexpressando o gene *Hahb-4* apresentaram maior taxa de sobrevivência e tiveram o crescimento menos afetado sob déficit hídrico severo, em comparação a plantas não transformadas (Dezar et al., 2005). Esse fator de transcrição é um componente da via de sinalização de etileno e induz o retardo da senescência e aumento da tolerância à desidratação. Sua superexpressão reduz a sensibilidade de plantas ao etileno exógeno, tem efeito repressor na expressão de genes da via de síntese e sinalização deste fito-hormônio e induz a expressão de genes envolvidos na osmoproteção (Manavella et al., 2006). Até o momento, esse evento está aprovado para plantio no Brasil, nos Estados Unidos da América e na Argentina.

A modulação da expressão do gene *BetA*, que codifica a enzima colina desidrogenase, envolvida na osmoproteção, também foi alvo da engenharia genética para o desenvolvimento de plantas tolerantes ao déficit hídrico. Plantas que superexpressam esse gene acumulam acentuadamente glicina betaína e, sob déficit hídrico, apresentam um melhor ajuste osmótico em folhas e raízes e menor inibição da fotossíntese, associada a valores superiores de condutância estomática e maior turgidez foliar, em comparação a plantas não transformadas. Também demonstraram menor peroxidação de lipídios e maior integridade de membranas celulares em condição de estresse (Quan et al., 2004; Lv et al., 2007). Apesar de os efeitos positivos da superexpressão de *BetA* na promoção da tolerância à seca terem sido demonstrados em plantas economicamente importantes, como milho e algodão, a tecnologia para comercialização está disponível apenas para cana-de-açúcar, com aprovação de uso somente na Indonésia.

Os avanços recentes no desenvolvimento de ferramentas genômicas permitiram o surgimento da engenharia genética de precisão, via tecnologias de edição genômica, com as quais é possível a manipulação específica de sequências

Tabela 1. Variedades de plantas obtidas por mutagênese induzida nos últimos 10 anos.

| Nome da variedade | País desenvolvedor | Ano de registro | Nome comum (nome científico) | Método de obtenção | Novas qualidades |
|-------------------|-----------------------|-----------------|---|---|---|
| Binadhan-19 | Bangladesh | 2017 | Arroz (<i>Oryza sativa</i>) | Irradiação com feixes de íons de carbono | Tolerância à seca, grãos longos e finos com cor amarela dourada |
| DT2010 | Vietnã | 2017 | Soja (<i>Glycine max</i>) | Cruzamento de duas variedades mutantes-induzidas | Precocidade, alta produtividade, resistência à ferrugem e tolerância à seca |
| DT2012 | Vietnã | 2017 | Soja (<i>G. max</i>) | Cruzamento de duas variedades mutantes-induzidas | Alta produtividade, resistência à ferrugem e tolerância à seca |
| Rc346 | Filipinas | 2013 | Arroz (<i>O. sativa</i>) | Irradiação com raios gama | Tolerância à seca |
| Hangmai901 | China | 2011 | Trigo (<i>Triticum aestivum</i>) | Mutagênese espacial e a técnica de duplo haploide | Tolerância à seca e alto peso de grãos |
| Rc272 | Filipinas | 2011 | Arroz (<i>O. sativa</i>) | Irradiação com raios gama | Tolerância à seca e salinidade |
| DT2008 | Vietnã | 2010 | Soja (<i>G. max</i>) | Irradiação com raios gama | Alta produtividade, resistência a míldio e tolerância à seca |
| Longfumai 19 | China | 2010 | Trigo (<i>T. aestivum</i>) | Mutagênese espacial | Tolerância à seca, alta produtividade e boa adaptabilidade |
| Huayu 32 | China | 2009 | Amendoim (<i>Arachis hypogaea</i>) | Hibridização com mutante obtido via irradiação com raios gama | Alta produtividade, boa qualidade, tolerância mediana à seca e tolerância à inundação |
| Fermer | Bulgária | 2009 | Trigo (<i>T. aestivum</i>) | Irradiação com raios gama | Alta produtividade, boa qualidade, tolerância à seca e ao frio e resistência à ferrugem |
| Longfumai 17 | China | 2007 | Trigo (<i>T. aestivum</i>) | Irradiação com raios gama | Boa qualidade de grãos, alta produtividade e tolerância à seca |
| MAGINE | Cuba | 2007 | Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>) | Irradiação com raios gama | Boa qualidade e tolerância à seca |
| Maybel | Cuba | 2007 | Tomate (<i>L. esculentum</i>) | Irradiação com raios gama | Alta performance em condição de seca |
| Shaannong 138 | China | 2007 | Trigo (<i>T. aestivum</i>) | Não informado | Tolerância à seca, alta produtividade e boa adaptabilidade |
| TAS-82 | Índia | 2007 | Girassol (<i>Helianthus annuus</i>) | Não informado | Tolerância à seca e resistência a fungo |
| Albisoara | República da Moldávia | 2007 | Soja (<i>G. max</i>) | Hibridização com variedade mutante-induzida | Tolerância à seca, alto conteúdo de proteínas e alta produtividade |
| Amelina | República da Moldávia | 2007 | Soja (<i>G. max</i>) | Hibridização com variedade mutante-induzida | Tolerância à seca, alto conteúdo de proteínas e alta produtividade |

Fonte: International Atomic Energy Agency (2018).

Tabela 2. Eventos de plantas transgênicas com características de tolerância à seca liberados comercialmente.

| Cultura/ nome evento | Gene/produto | Fonte do gene | Função | Desenvolvedor |
|--|---|--|--|------------------------|
| Milho (<i>Zea mays</i>)/ MON87460 | <i>BscspB</i> / proteína de choque frio B | <i>Bacillus subtilis</i> | Mantém funcionamento celular sob déficit hídrico pela preservação da qualidade do RNA e tradução | Monsanto/Basf |
| Soja (<i>Glycine max</i>)/ IND-00410-5 | <i>Hahb-4</i> / fator de transcrição | <i>Helianthus annuus</i> | Controle da transcrição de genes em condição de desidratação | Verdeca |
| Cana-de-açúcar (<i>Saccharum sp.</i>)/ NX1T, NX4T, NX6T | <i>BetA</i> /colina desidrogenase | <i>Escherichia coli</i> <i>Rhizobium meliloti</i> | Catalisa a produção do osmoprotetor glicina betaina | PT Pertamina (Persero) |

Fonte: International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (2019).

de DNA de um indivíduo, tanto quanto ao tipo de mutação a ser introduzida, como ao seu local de inserção no genoma. Com esses métodos, a mutagenese induzida passa a não ser mais um fenômeno aleatório. Dentre os disponíveis, merece destaque a tecnologia CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*), pela sua relativa simplicidade, eficiência e baixo custo. Esse método é baseado no sistema de defesa de procariotos no qual uma nucleasse bacteriana é direcionada a uma sequência específica no genoma, guiada por uma molécula de RNA com aproximadamente 20 pb. A enzima é capaz de clivar a dupla fita de DNA em uma região pré-determinada do genoma da planta, e o seu sistema de reparo propicia a união de extremidades não homólogas, levando a inserção ou deleção de bases e consequente perda da função gênica pela introdução de mutações de alteração ou perda de sentido e tradução de uma proteína truncada ou incompleta. Outra forma de reparo é por homologia direta, por meio do qual é possível realizar inserções ou substituições de sequências de DNA sítio-dirigidas. O método CRISPR pode ser considerado revolucionário pela sua universalidade, pela agilidade em se gerar indivíduos com o geno-

ma editado de forma precisa e também por ser possível produzir mutantes homocigotos para múltiplos genes alvos em uma única geração (Jinek et al., 2012; Belhaj et al., 2015).

Apesar de a tecnologia CRISPR ser relativamente recente, já há casos descritos de seu uso na geração de plantas mais tolerantes ao déficit hídrico. Shi et al. (2017) utilizaram essa tecnologia para o controle da expressão em milho do gene *ZmARGOS8*, um regulador negativo da via de resposta a etileno. A proteína ARGOS8 interage com receptores da via de sinalização, modulando a percepção de etileno em estágios iniciais da via de transdução de sinal. Neste trabalho, o nível de expressão de *ZmARGOS8* foi aumentado por meio da inserção da região promotora de outro gene do milho ou pela substituição de sua região promotora nativa. Estudos em condição de campo mostraram que, em comparação ao genótipo não editado, essas variantes *ZmARGOS8* apresentaram aumento de produtividade de grão sob déficit hídrico na fase de floração, demonstrando a aplicação da tecnologia CRISPR na geração de novas variantes alélicas úteis ao melhoramento genético visando à tolerância a estresses abióticos.

A tecnologia CRISPR apresenta grande potencial para o acelerar o desenvolvimento de culturas biotecnológicas e facilitar o processo de regulamentação e seu uso comercial, uma vez que a indução de pequenas modificações no genoma da planta, como mutações pontuais, pode não ser considerada transgenia. No Brasil, já há caso de aprovação para uso comercial de uma variedade de milho ceroso da empresa Corteva com elevado teor de amilopectina, obtido pela inativação de um gene responsável pela amilose (*Wx1*) (Chilcoat et al., 2017).

Considerações finais

Os recursos genéticos vegetais compõem as bases da segurança alimentar e incluem uma grande diversidade de espécies silvestres, variedades tradicionais ou crioulas e as cultivares modernas, incluindo as biotecnológicas. Esses recursos são diretamente utilizados para a alimentação humana ou animal, produção de fibras, energia, vestimentas e abrigos. A conservação e o uso sustentável desses recursos tornam-se essenciais para se assegurar a produção agrícola e encarar os crescentes desafios gerados pelas mudanças climáticas.

O melhoramento para o aumento da produtividade de culturas em condições subótimas ou de estresses abióticos intensificados, como a seca, seguirá a tendência de uso de múltiplas abordagens, necessitando a integração de técnicas de melhoramento clássico, de biotecnologia e de manejo de culturas. Outro ponto crucial será a necessidade de diversificação de culturas agrícolas.

As modernas ferramentas genômicas permitiram, com intenso potencial, a identificação de reguladores chave do estado hídrico das plantas e o rápido desenvolvimento de diversas abordagens para a aquisição de plantas mais tolerantes à seca. No entanto, apesar de a contribuição positiva da biotecnologia na geração de novas cultivares tolerantes à seca ser consenso, algumas dificuldades ainda precisam ser superadas como:

- O fato de os processos metabólicos que contribuem para a tolerância à seca em plantas não estarem totalmente elucidados, o que ainda exige intensa pesquisa nessa área do conhecimento.
- As particularidades da grande variedade de espécies vegetais, o que faz com que, em algumas situações, a tecnologia desenvolvida para uma espécie não seja transponível com igual eficiência para outra, necessitando contínuos estudos e inovações.
- O elevado custo para o desenvolvimento e liberação de uma cultura biotecnológica no mercado, o que faz com que instituições públicas de pesquisa e ensino brasileiras, que dominam as mais modernas ferramentas biotecnológicas, se tornem pouco competitivas na geração dessas tecnologias, que é dominada pelas grandes empresas privadas do setor. O elevado custo de liberação de culturas biotecnológicas também inviabiliza o emprego da tecnologia para culturas com pouco potencial econômico.
- O acesso dificultado às mais recentes tecnologias aos pequenos produtores, geralmente presentes em áreas marginais, mais suscetíveis aos efeitos das mudanças climáticas.

Referências

- ALTER, S.; BADER, K. C.; SPANNAGL, M.; WANG, Y.; BAUER, E.; SCHÖN, C. C.; MAYER, K. F. DroughtDB: an expert-curated compilation of plant drought stress genes and their homologs in nine species. **Database**, v. 2015, 46, p. 1-7, May 2015. DOI: [10.1093/database/bav046](https://doi.org/10.1093/database/bav046).
- ARAÚJO, F. P. de; MELO, N. F. de; FALEIRO, F. G. **Cultivar de maracujazeiro silvestre (*Passiflora cincinnata* Mast.) para a Caatinga e para o Cerrado BRS Sertão Forte**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2016. 2 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1046334/1/Folder12016.pdf>. Acesso em: 16 set. 2019.
- BASSU, S.; BRISSON, N.; DURAND, J. L.; BOOTE, K.; LIZASO, J.; JONES, J. W.; ROSENZWEIG, C.; RUANE, A. C.; ADAM, M.; BARON, C.; BASSO, B.; BIERNATH, C.; BOOGAARD, H.; CONIUN, S.; CORBEELS, M.; DERYNG, D. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? **Global Change Biology**, v. 20, n. 7, p. 2301-2320, 2014. DOI: [10.1111/gcb.1252](https://doi.org/10.1111/gcb.1252).

- BELHAJ, K.; CHAPARRO-GARCIA, A.; KAMOUN, S.; PATRON, N. J.; NEKRASOV, V. Editing plant genomes with CRISPR/Cas9. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 32, p. 76-84, Apr. 2015. DOI: [10.1016/j.copbio.2014.11.007](https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.11.007).
- BEVAN, M. W.; FLAVELL, R. B.; CHILTON, M. D. A chimaeric antibiotic resistance gene as a selectable marker for plant cell transformation. **Nature**, v. 304, p. 184-187, 1983. DOI: [10.1038/304184a0](https://doi.org/10.1038/304184a0).
- BLUM, A. Genetic resources for drought resistance. In: BLUM, A. **Plant breeding for water-limited environments**. New York: Springer, 2011. p. 217-234.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **CultivarWeb**: Registro Nacional de Cultivares – RNC. Brasília, DF, 2019. Disponível em: http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php. Acesso em: 22 ago. 2019.
- BRASILEIRO, A. C. M.; MORGANTE, C. V.; ARAUJO, A. C. G.; SORAYA C. M.; LEAL-BERTIOLI, S. C. M.; SILVA, A. K.; MARTINS, A. C. Q.; VINSON, C. C.; SANTOS, C. M. R.; BONFIM, O.; TOGAWA, R. C.; SARAIVA, M. A. P.; BERTIOLI, D. J.; GUIMARAES, P. M. Transcriptome profiling of wild *Arachis* from water-limited environments uncovers drought tolerance candidate genes. **Plant Molecular Biology Reporter**, v. 33, n. 6, p. 1876-1892, Apr. 2015. DOI: [10.1007/s11105-015-0882-x](https://doi.org/10.1007/s11105-015-0882-x).
- CASTAÑEDA-ÁLVAREZ, N. P.; KHOURY, C. K.; ACHICANOY, H. A.; BERNAU, V.; DEMPEWOLF, H.; EASTWOOD, R. J.; GUARINO, L.; HARKER, R. H.; JARVIS, A.; MAXTED, N.; MÜLLER, J. V.; RAMIREZ-VILLEGAS, J.; SOSA, C. C.; STRUIK, P. C.; VINCENT, H.; TOLL, J. Global conservation priorities for crop wild relatives. **Nature Plants**, v. 2, Mar. 2016. DOI : [10.1038/nplants.2016.22](https://doi.org/10.1038/nplants.2016.22).
- CERA, J. C.; STRECK, N. A.; FENSTERSEIFER, C. A. J.; FERRAZ, S. E. T.; BEXAIRA, K. P.; SILVEIRA, W. B.; CARDOSO, A. P. Soybean yield in future climate scenarios for the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 6, p. 380-392, 2017. DOI: [10.1590/s0100-204x2017000600002](https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000600002).
- CHARMET, G. Wheat domestication: lessons for the future. **Comptes Rendus Biologies**, v. 334, n. 3, p. 212-220, Mar. 2011. DOI: [10.1016/j.crv.2010.12.013](https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.12.013).
- CHILCOAT, D.; LIU, Z.-B.; SANDER, J. Use of CRISPR/Cas9 for crop improvement in maize and soybean. **Progress in Molecular Biology and Translational Science**, v. 149, p. 27-46, 2017. DOI: [10.1016/bs.pmbts.2017.04.005](https://doi.org/10.1016/bs.pmbts.2017.04.005).
- DEZAR, C. A.; GAGO, G. M.; GONZÁLEZ, D. H.; CHAN, R. L. *Hahb-4*, a sunflower homeobox-leucine zipper gene, is a developmental regulator and confers drought tolerance to *Arabidopsis thaliana* plants. **Transgenic Research**, v. 14, n. 4, p. 429, Mar. 2005. DOI: [10.1007/s11248-005-5076-0](https://doi.org/10.1007/s11248-005-5076-0).
- DHANKHER, O. P.; FOEYR, C. H. Climate resilient crops for improving global food security and safety. **Plant, Cell & Environment**, v. 41, n. 5, p. 877-884, Apr. 2018. DOI: [10.1111/pce.13207](https://doi.org/10.1111/pce.13207).
- DUTRA, W. F.; GUERRA, Y. L.; RAMOS, J. P. C.; FERNANDES, P. D.; SILVA, C. R. C.; BERTIOLI, D. J.; LEAL-BERTIOLI, S. C. M.; SANTOS, R. C. Introgression of wild alleles into the tetraploid peanut crop to improve water use efficiency, earliness and yield. **Plos One**, v. 13, n. 6, e0198776, 2018. DOI: [10.1371/journal.pone.0198776](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198776).
- EMBRAPA. **Alelo**. Disponível em: <http://alelobag.cenargen.embrapa.br>. Acesso em: 20 ago. 2019.
- FAO. **Biodiversity**. Disponível em: <http://www.fao.org/biodiversity/components/plants/en>. Acesso em: 3 set. 2018.
- FARRANT, J. M.; MOORE, J. P. Programming desiccation-tolerance: from plants to seeds to resurrection plants. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 14, n. 3, p. 340-345, June 2011. DOI: [10.1016/j.pbi.2011.03.018](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2011.03.018).
- GENESYS. **Genesys is an online platform where you can find information about Plant Genetic Resources for Food and Agriculture (PGRFA) conserved in genebanks worldwide**. Disponível em: <https://www.genesys-pgr.org>. Acesso em: 20 ago. 2019.
- GOODSTEIN, D. M.; SHU, S.; HOWSON, R.; NEUPANE, R.; HAYES, R. D.; FAZO, J.; MITROS, T.; DIRKS, W.; HELLSTEN, U.; PUTNAM, N.; ROKHSAR, D. S. Phytozome: a comparative platform for green plant genomics. **Nucleic Acids Research**, v. 40, p. 1178-1186, Jan. 2012. DOI: [10.1093/nar/gkr944](https://doi.org/10.1093/nar/gkr944).
- GUIMARAES, L. A.; MOTA, A. P. Z.; ARAUJO, A. C. G.; FIGUEIREDO, L. F. A.; PEREIRA, B. M.; SARAIVA, M. A. P.; SILVA, R. B.; DANCHIN, E. G. J.; GUIMARAES, P. M.; BRASILEIRO, A. C. M. Genome-wide analysis of expansin superfamily in wild *Arachis* discloses a stress-responsive expansin-like B gene. **Plant Molecular Biology**, v. 94, n. 1-2, p. 79-96, 2017. DOI: [10.1007/s11103-017-0594-8](https://doi.org/10.1007/s11103-017-0594-8).
- HAUDRY, A.; CENCI, A.; RAVEL, C.; BATAILLON, T.; BRUNEL, D.; PONCET, C.; HOCHU, I.; POIRIER, S.; SANTONI, S.; GLÉMIN, S.; DAVID, J. Grinding up wheat: A massive loss of nucleotide diversity since domestication. **Molecular Biology and Evolution**, v. 24, n. 7, p. 1506-1517, July 2007. DOI: [10.1093/molbev/msm077](https://doi.org/10.1093/molbev/msm077).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Mutant variety database**. Disponível em: <https://mvd.iaea.org/#!Search>. Acesso em: 27 jul. 2018.
- INTERNATIONAL SERVICE FOR THE ACQUISITION OF AGRI-BIOTECH APPLICATIONS. **Brief 54**: Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2018. Disponível em: <http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/54/default.asp>. Acesso em: 10 jul. 2019.
- JARAMILLO, J.; CHABI-OLAYE, A.; KAMONJO, C.; JARAMILLO, A.; VEGA, F. E.; POEHLING, H.-M.; BORGEMEISTER, C. Thermal tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: Predictions of climate change impact on a tropical insect pest. **Plos One**, v. 4, n. 8, e6487, Ago. 2009. DOI: [10.1371/journal.pone.0006487](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006487).

- JIA, G.; SHEVLIKOVA, E. Land-climate interactions. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change land**: special report. Cambridge University Press, 2019. cap. 2, p. 132-247. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/05/Chapter_2_FINAL.pdf Acesso em: 15 ago. 2019.
- JINEK, M.; CHYLINSKI, K.; FONFARA, I.; HAUER, M.; DOUDNA, J. A.; CHARPENTIER, E. A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. **Science**, v. 337, n. 6096, p. 816-821, Aug. 2012. DOI: [10.1126/science.1225829](https://doi.org/10.1126/science.1225829).
- KEW ROYAL BOTANIC GARDEN. **Plant Genomics 2017**. Disponível em: <https://stateoftheworldsplants.org/2017/plant-genomics.html>. Acesso em: 21 set. 2018.
- KHARKWAL, M. C. A brief history of plant mutagenesis. In: SHU, Q. Y.; FORSTER, B. P.; NAKAGAWA, H. (ed.). **Plant mutation breeding and biotechnology**. Oxfordshire: CAB International: FAO, 2012. p. 21-30.
- KOLE, C.; MUTHAMILARASAN, M.; HENRY, R.; EDWARDS, D.; SHARMA, R.; ABBERTON, M.; BATLEY, J.; BENTLEY, A.; BLAKENEY, M.; BRYANT, J.; CAI, H.; CAKIR, M.; CSEKE, L. J.; COCKRAM, J.; OLIVEIRA, A. C. de; PACE, C.; DEMPEWOLF, H.; ELLISON, S.; GEPTS, P.; GREENLAND, A.; HALL, A.; HORI, K.; HUGHES, S.; HUMPHREYS, M. W.; IORIZZO, M.; ISMAIL, A. M.; MARSHALL, A.; MAYES, S.; NGUYEN, H. T.; OGBONNAYA, F. C.; ORTIZ, R.; PATERSON, A. H.; SIMON, P. W.; TOHME, J.; TUBEROSA, R.; VALLIYODAN, B.; VARSHNEY, R. K.; WULLSCHLEGER, S. D.; YANO, M.; PRASAD, M. Application of genomics-assisted breeding for generation of climate resilient crops: progress and prospects. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 563, Ago. 2015. DOI: [10.3389/fpls.2015.00563](https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00563).
- KRAMER, M. G.; REDENBAUGH, K. Commercialization of a tomato with an antisense polygalacturonase gene: The FLAVR SAVR™ tomato story. **Euphytica**, v. 79, p. 293-297, 1994. DOI: [10.1007/BF00022530](https://doi.org/10.1007/BF00022530).
- LE, T. T. T.; WILLIAMS, B.; MUNDREE, S. G. An osmotin from the resurrection plant *Tripogon loliiformis* (TIOsm) confers tolerance to multiple abiotic stresses in transgenic rice. **Physiologia Plantarum**, v. 162, n. 1, p. 13-34, jan. 2018. DOI: [10.1111/ppl.12585](https://doi.org/10.1111/ppl.12585).
- LIN, B. B. Resilience in agriculture through crop diversification: Adaptive management for environmental change. **BioScience**, v. 61, n. 3, p. 183-193, Mar. 2011. DOI: [10.1525/bio.2011.61.3.4](https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4).
- LIU, X.; WANG, Z.; WANG, L.; WU, R.; PHILLIPS, J.; DENG, X. LEA 4 group genes from the resurrection plant *Boea hygrometrica* confer dehydration tolerance in transgenic tobacco. **Plant Science**, v. 176, n. 1, p. 90-98, Jan. 2009. DOI: [10.1016/j.plantsci.2008.09.012](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2008.09.012).
- LU, X.; YIN, Z.; WANG, J.; CHEN, X.; WANG, D.; WANG, S.; GUO, L.; FAN, W.; CHEN, C.; WANG, X.; CUI, R.; ZHANG, B.; HAN, M.; YANG, X.; YE, W. Identification and function analysis of drought-specific small RNAs in *Gossypium hirsutum* L. **Plant Science**, v. 280, p. 187-196, Mar. 2019. DOI: [10.1016/j.plantsci.2018.11.015](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.11.015).
- LV, S.; YANG, A.; ZHANG, K.; WANG, L.; ZHANG, J. Increase of glycine betaine synthesis improves drought tolerance in cotton. **Molecular Breeding**, v. 20, n. 3, p. 233-248, Oct. 2007. DOI: [10.1007/s11032-007-9086-x](https://doi.org/10.1007/s11032-007-9086-x).
- MANAVELLA, P. A.; ARCE, A. L.; DEZAR, C. A.; BITTON, F.; RENOU, J.-P.; CRESPI, M.; CHAN, R. L. Cross-talk between ethylene and drought signalling pathways is mediated by the sunflower *Hahb-4* transcription factor. **The Plant Journal**, v. 48, n. 1, p. 125-137, Oct. 2006. DOI: [10.1111/j.1365-3113X.2006.02865.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2006.02865.x).
- MBINDA, W.; OMBORI, O.; DIXELIUS, C.; ODUOR, R. *Xerophyta viscosa* aldose reductase, *XvAld1*, enhances drought tolerance in transgenic sweetpotato. **Molecular Biotechnology**, v. 60, n. 3, p. 203-214, 2018. DOI: [10.1007/s12033-018-0063-x](https://doi.org/10.1007/s12033-018-0063-x).
- MOUSAVI-DERAZMAHALLEH, M.; BAYER, P. E.; HANE, J. K.; VALLIYODAN, B.; NGUYEN, H. T.; NELSON, M. N.; ERSKINE, W.; VARSHNEY, R. K.; PAPA, R.; EDWARDS, D. Adapting legume crops to climate change using genomic approaches. **Plant, Cell and Environment**, v. 42, n. 1, p. 6-19, 2019. DOI: [10.1111/pce.13203](https://doi.org/10.1111/pce.13203).
- NEMALI, K. S.; BONIN, C.; DOHLEMAN, F. G.; STEPHENS, M.; REEVES, W. R.; NELSON, D. E.; CASTIGLIONI, P.; WHITSEL, J. E.; SAMMONS, B.; LAWSON, M. Physiological responses related to increased grain yield under drought in the first biotechnology-derived drought-tolerant maize. **Plant, Cell and Environment**, v. 38, n. 9, p. 1866-1880, 2015. DOI: [10.1111/pce.12446](https://doi.org/10.1111/pce.12446).
- OLIVER, M. J.; TUBA, Z.; MISHLER, B. D. The evolution of vegetative desiccation tolerance in land plants. **Plant Ecology**, v. 151, p. 85-100, 2000. DOI: [10.1023/A:1026550808557](https://doi.org/10.1023/A:1026550808557).
- PÁDUA, J. G. Banco genético da Embrapa e o seu papel de conservação da diversidade genética da flora brasileira. **RG News**, v. 2, n. 1, p. 62-69, 2016.
- PARRY, M. A. J.; MADGWICK, P. J.; BAYON, C.; TEARALL, K.; HERNANDEZ-LOPEZ, A.; BAUDO, M.; RAKSZEGLI, M.; HAMADA, W.; AL-YASSIN, A.; OUABBOU, H.; LABHILILI, M.; PHILLIPS, A. L. Mutation discovery for crop improvement. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 10, p. 2817-28251, July 2009. DOI: [10.1093/jxb/erp189](https://doi.org/10.1093/jxb/erp189).
- PLACIDO, D. F.; CAMPBELL, M.; JIN, J.; CUI, X.; KRUGER, G. R.; BAENZIGER, P. S.; WALIA, H. Introgression of novel traits from a wild wheat relative improves drought adaptation in wheat (*Triticum aestivum*). **Plant Physiology**, v. 161, n. 4, p. 1806-1819, Apr. 2013. DOI: [10.1104/pp.113.214262](https://doi.org/10.1104/pp.113.214262).
- QUAN, R.; SHANG, M.; ZHANG, H.; ZHAO, Y.; ZHANG, J. Engineering of enhanced glycine betaine synthesis improves drought tolerance in maize. **Plant Biotechnology Journal**, v. 2, n. 6, p. 477-486, 2004. DOI: [10.1111/j.1467-7652.2004.00093.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2004.00093.x).

SANTOS, C. A. F.; CAVALCANTI, N. B.; NASCIMENTO, C. E. S.; LIMA FILHO, J. M. P.; ANJOS, J. B.; OLIVEIRA, V. R. Umbuzeiro: pesquisas, potenciais e desafios. In: ROMÃO, R. R.; RAMOS, S. R. R. (org.). **Recursos genéticos vegetais no Estado da Bahia**. Feira de Santana: Ed. da UEFS, 2005. p. 69-81.

SCOTT, P. Resurrection plants and the secrets of eternal leaf. **Annals of Botany**, v. 85, n. 2, p. 159-166, Feb. 2000. DOI: [10.1006/anbo.1999.1006](https://doi.org/10.1006/anbo.1999.1006).

SHI, J.; GAO, H.; WANG, H.; LAFITTE, H. R.; ARCHIBALD, R. L.; YANG, M.; HAKIMI, S. M.; MO, H.; HABBEN, J. E. ARGOS8 variants generated by CRISPR-Cas9 improve maize grain yield under field drought stress conditions. **Plant Biotechnology Journal**, v. 15, n. 2, p. 207-216, 2017. DOI: [10.1111/pbi.12603](https://doi.org/10.1111/pbi.12603).

VARSHNEY, R. K.; SINGH, V. K.; KUMAR, A.; POWELL, W.; SORRELLS, M. E. Can genomics deliver climate-change ready crops? **Current Opinion in Plant Biology**, v. 45, Part B, p. 1-7, Oct. 2018. DOI: [10.1016/j.pbi.2018.03.007](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2018.03.007).

WANG, B.; DU, H.; ZHANG, Z.; XU, W.; DENG, X. *BhbZIP60* from resurrection plant *Boea hygrometrica* is an mRNA splicing-activated endoplasmic reticulum stress regulator involved in drought tolerance. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 245, 2017. DOI: [10.3389/fpls.2017.00245](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00245).

WRIGHT, S. I.; BI, I. V.; SCHROEDER, S.G.; YAMASAKI, M.; DOEBLEY, J. F.; MCMULLEN, M. D.; GAUT, B. S. The effects of artificial selection on the maize genome. **Science**, v. 308, n. 5726, p. 1310-1314, 2005. DOI: [10.1126/science.1107891](https://doi.org/10.1126/science.1107891).

ZHANG, Z.; CUI, F.; ZHANG, L.; WEN, X.; LUO, X.; ZHOU, Y.; LI, X.; WAN, Y.; ZHANG, J.; XIE, J. Development and identification of a introgression line with strong drought resistance at seedling stage derived from *Oryza sativa* L. mating with *Oryza rufipogon* Griff. **Euphytica**, v. 200, n. 1, p. 1-7, 2014. DOI: [10.1007/s10681-014-1121-5](https://doi.org/10.1007/s10681-014-1121-5).

Estratégias de adaptação para o manejo de doenças de plantas em regiões semiáridas sob os impactos das mudanças climáticas

Francislene Angelotti
Emília Hamada

Introdução

Os patógenos de plantas podem causar danos significativos aos cultivos, diminuindo seu rendimento (Kashyap et al., 2017); contudo podem ocorrer variações entre os sistemas de produção (Oerke, 2006). Geralmente, cerca de um terço da produção pode ser perdida pela ocorrência de doenças em plantas (Bentley et al., 2009).

Além dos danos causados por doenças, as alterações no cenário climático atual, previstos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), como os aumentos de temperatura e as modificações nos padrões de precipitação, poderão causar riscos à segurança alimentar (Pachauri; Meyer, 2014).

O clima favorece a ocorrência de problemas fitossanitários que, por sua vez, interferem no crescimento das plantas, atuando de maneira significativa sobre a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas de produção. Assim, a prospecção desses efeitos para os diferentes patossistemas é uma linha de pesquisa estratégica para a segurança alimentar. Mas, não basta apenas a avaliação do impacto das mudanças climáticas, é importante considerar-se também o desenvolvimento de estratégias e opções de adaptação (Das et al., 2016). Nesse sentido, somente a partir do fortalecimento da base de conhecimento relevante dos diferentes impactos sobre o patógeno e a planta hospedeira, será

possível utilizar, ajustar e melhorar consistentemente as estratégias de proteção de plantas e, conseqüentemente, implementar medidas de adaptação às mudanças climáticas (Juroszek; Tiedemann, 2011) (Figura 1). Diversas técnicas de manejo foram desenvolvidas ao longo dos anos para garantir a proteção de plantas e, dentre essas tecnologias, destacam-se os controles genético, cultural, químico e biológico. A aplicação dessas medidas varia de acordo com o grau de tecnificação dos diferentes grupos de agricultores. Assim, as ações de adaptação às mudanças no clima podem não representar um desafio completamente novo, uma vez que, ao longo da evolução da agricultura, técnicas vêm sendo disponibilizadas, levando em conta a variabilidade climática de um local e o período do ano para a obtenção de aumento na produtividade, visando à sustentabilidade dos cultivos.

Com os prognósticos climáticos, o avanço do conhecimento deverá elucidar como essas alterações irão impactar os diferentes patossistemas, englobando as respostas do patógeno e da planta, a fim de entender se as estratégias de manejo adotadas continuarão tendo ação efetiva. Nesse sentido, a pesquisa científica continuará tendo um papel decisório para adaptar e readequar as estratégias e ferramentas de proteção de cultivos. Desde já, vislumbra-se que sistemas de produção agrícola diversificados, flexíveis e resilientes serão necessários.

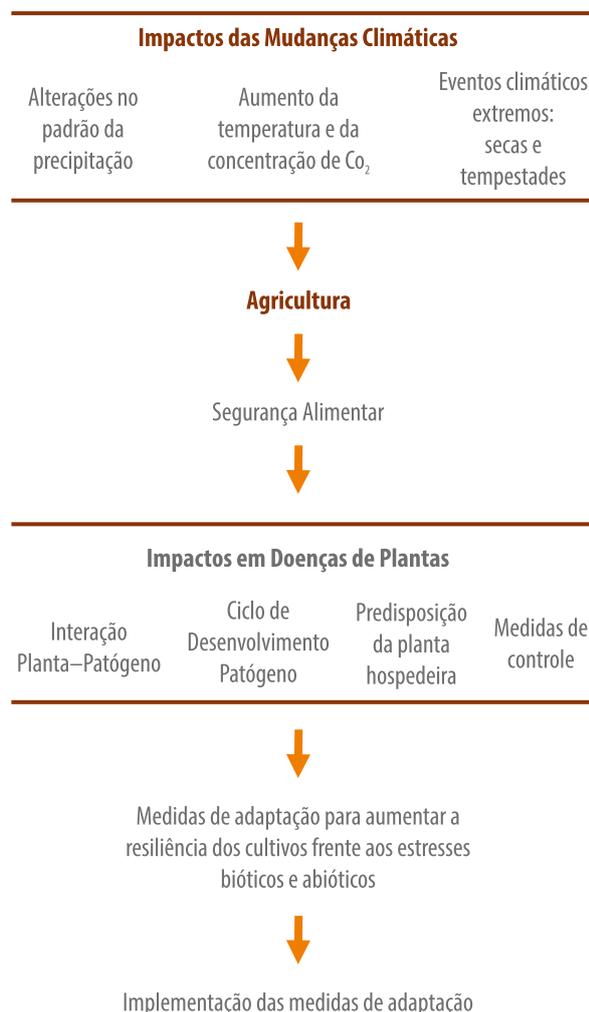


Figura 1. Mudanças climáticas e proteção de plantas: impactos e estratégias de adaptação.

Assim, este capítulo apresentará os principais impactos causados pelas mudanças climáticas em patossistemas de clima semiárido e as medidas de adaptação que poderão ser adotadas frente às diferentes respostas do patógeno e da planta hospedeira.

Potencial impacto das mudanças climáticas sobre doenças de plantas em regiões semiáridas

Os impactos das mudanças climáticas frente aos cenários futuros poderão ser negativos, po-

sitivos ou neutros. Isso pode ser explicado pela especificidade de cada patossistema, representado pela diversidade e virulência de cada gênero/espécie de microrganismo e pela variabilidade genética das diferentes populações de patógenos e das plantas hospedeiras (Garret, 2006; Sharma et al., 2010).

Quando se trata do patógeno, o impacto pode ser verificado diretamente na taxa de progresso da doença, na perda de resistência do hospedeiro, na distribuição geográfica e temporal e em alterações nas relações intraespecíficas (Pande; Sharma, 2011). Por outro lado, os impactos também podem estar voltados à predisposição da planta hospedeira. Sabe-se que, frente aos cenários climáticos futuros, com previsão de aumento da temperatura e de déficit de água, as plantas estarão predispostas à ação desses estresses abióticos, tornando-se mais ou menos resistentes aos fatores bióticos, como os patógenos. Um exemplo disso foi verificado por Desprez-Loustau et al. (2006), ao constatar que, em períodos secos, a ocorrência de patógenos em plantas lenhosas foi maior. Isso ocorreu principalmente devido aos efeitos indiretos na fisiologia da planta hospedeira. No Semiárido brasileiro, a ocorrência da forma endofítica do fungo *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griff. & Maubl., em uma ampla gama de hospedeiro, tornou-se uma ameaça, visto que os estresses ambientais, como o déficit hídrico, podem aumentar a agressividade desse microrganismo, limitando a produção agrícola (Oliveira et al., 2013; Gonçalves et al., 2016).

Em estudos realizados na região semiárida da Índia, foi possível verificar que as plantas de grão-de-bico (*Cicer arietinum* L) cultivadas em condições de sequeiro tiveram maior predisposição à ocorrência da podridão-radicular, causada por *Rhizoctonia bataticola* (taub.). Para essa mesma cultura, o grupo de pesquisa também constatou que a podridão-radicular-seca, causada por fungos do gênero *Fusarium*, apresentou maior incidência quando a temperatura do ar ultrapassou 33 °C (Pande; Sharma, 2010; Sharma et al., 2010).

No Semiárido brasileiro, já foram realizados estudos com doenças da videira (*Vitis* sp.), feijão-caupi (*Vigna unguiculata*), melão (*Cucumis melo* L.) e banana (*Musa* sp.) para avaliar o efeito do aumento da temperatura em condições controladas (Figura 2) (Magalhães et al., 2012; Santana, 2013; Angelotti et al., 2017a; Conceição et al., 2017; Araújo, 2019) e também por meio de simulação (Hamada et al., 2015; Angelotti et al., 2017a, 2017b) (Tabela 1). Os resultados apontaram diferentes respostas para cada patossistema, confirmando a especificidade de cada um, por meio da diversidade e virulência de cada gênero/espécie de microrganismo e até mesmo pela variabilidade genética das diferentes cultivares de plantas (Angelotti et al., 2017a).

A ocorrência de oídio, geralmente, é favorecida em ambientes secos e com temperatura entre 20 °C e 25 °C. A severidade do oídio da videira [*Uncinula necator* (Schwein.) Burril], do oídio do feijão-caupi (*Oidium* sp.) e do oídio do meloeiro (*Phodosphaera xanthii* Braun & Shishkoff) poderá ser reduzida com o aumento da temperatura do ar. Para esses três patossistemas, foi observado aumento do período latente e, conseqüentemente, aumento no tempo para o aparecimento da epidemia (Magalhães et al., 2012; Santana, 2013; Araújo, 2019).

Ainda para o cultivo do meloeiro, no cenário climático futuro, o crestamento gomoso do caule, causado pelo fungo *Didymella bryoniae* (Auersw) Rehm, continuará tendo a mesma importância econômica, necessitando de técnicas de manejo que reduzam a incidência e a severidade da doença (Brunelli et al., 2008). De maneira geral, o clima do Semiárido brasileiro apresenta-se pouco favorável à ocorrência de doenças bacterianas, mas propício às viroses, devido à favorabilidade climática para o desenvolvimento e para a sobrevivência dos vetores (Brunelli et al., 2008).

Além do aumento da temperatura do ar, alterações no padrão da precipitação com chuvas torrenciais e/ou períodos prolongados de seca também causarão impactos nas doenças de plantas. Na Índia, a maior ocorrência de *Phytophthora drechsleri* Tucker f. sp. *cajani* e

Alternaria spp. em feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh) está associada a chuvas irregulares e pesadas (> 300 mm em 6–7 dias) (Sharma et al., 2006; Pande; Sharma, 2011).

As alterações na dinâmica dos patossistemas, com aumento ou redução na severidade das doenças, terão efeito direto nas práticas de manejo. A eficácia e persistência dos fungicidas e o desenvolvimento de resistência em populações de patógenos são temas que ainda requerem maior compreensão frente a essas mudanças. Entretanto, sabe-se que a temperatura pode influenciar diretamente na degradação de produtos químicos e indiretamente na penetração, translocação, persistência e nos modos de ação de fungicidas sistêmicos, devido às alterações na morfologia e fisiologia das plantas hospedeiras (Coakley et al., 1999). Além disso, a alteração no padrão das chuvas poderá aumentar a frequência no uso de fungicidas (Pande; Shama, 2011). Isso poderá ter como consequência o desenvolvimento de patógenos resistentes aos fungicidas e um aumento no custo de produção (Juroszek; Tiedemann, 2011). Por outro lado, o míldio da videira terá sua favorabilidade climática reduzida no Semiárido brasileiro, o que poderá implicar em um menor número de aplicações de fungicidas. De maneira que a especificidade de cada patossistema (doença/cultura) terá de ser analisada, pois os custos associados à proteção de plantas também poderão variar no cenário climático futuro.

Do mesmo modo que o aumento da temperatura terá efeito direto no ciclo de vida de microrganismos fitopatogênicos, a dinâmica populacional de microrganismos utilizados como agentes de controle biológico também poderá ser alterada. Uma análise dos efeitos das mudanças climáticas sobre as agentes de biocontrole de doenças de plantas no Brasil indicou que *Bacillus subtilis* e *Trichoderma* spp. poderão ser menos afetados; no entanto, os autores relataram que a eficiência de *Coniothyrium minitans* e *Clonostachys rosea* poderá ser reduzida (Ghini et al., 2011).

Os estudos sobre os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre a ocorrência de proble-



Foto: Francislene Angelotti

Figura 2. Diferentes patossistemas estudados em condições controladas no Semiárido brasileiro: míldio da videira (A); cancro bacteriano da videira (B); ferrugem da videira (C); oídio do meloeiro (D); oídio do feijão-caupi (E); oídio da videira (F).

Tabela 1. Impacto do aumento da temperatura na ocorrência de doenças de plantas em regiões semiáridas.

| Cultura | Patógeno | Doença | Tendência da favorabilidade | Referência |
|--------------|---|------------------------|-----------------------------|---|
| Grão-de-bico | <i>Rhizoctonia bataticola</i> | Podridão-radicular | Aumento | Sharma et al. (2015) |
| Grão-de-bico | <i>Fusarium oxysporum</i> | Podridão seca da raiz | Aumento | Pande e Sharma (2010) Sharma et al. (2010) |
| Guandu | <i>Phytophthora cajani</i> | Queima | Aumento | Singh et al. (2017) |
| Feijão-caupi | <i>Oidium</i> sp. | Oídio | Redução | Santana (2013) |
| Melão | <i>Phodosphaera xanthii</i> | Oídio | Redução | Araújo (2019) |
| Uva | <i>Uncinula necator</i> | Oídio | Aumento | Hamada et al. (2015) |
| Uva | <i>Plasmopara viticola</i> | Míldio | Redução | Angelotti et al. (2017a) |
| Uva | <i>Botrytis cinerea</i> | Podridão-cinzenta | Redução | Hamada et al. (2011) |
| Uva | <i>Greeneria uvicola</i> | Podridão-amarga | Redução | Hamada et al. (2012) |
| Uva | <i>Glomerella cingulata</i> | Podridão da uva madura | Redução | Hamada et al. (2011) |
| Uva | <i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>viticola</i> | Cancro-bacteriano | Não haverá alteração | Angelotti et al. (2017b) |

mas fitossanitários busca antecipar a resposta e aprimorar o conhecimento frente a essa complexidade biológica. A informação da predição de doenças com potencial de incidência e severidade mais graves às culturas agrícolas poderá contribuir para que os produtores tenham estratégias disponíveis para controlar as doenças de plantas, por meio de medidas de adaptação.

Medidas de adaptação para a proteção de plantas

Os impactos da mudança climática na severidade de doenças de plantas não dependerão apenas das alterações no clima, mas também da dinâmica interna do sistema agrícola e de sua capacidade para se adaptar a essas mudanças. Assim, as medidas de adaptação, conhecidas como um conjunto de ações e/ou iniciativas

para reduzir a vulnerabilidade dos sistemas naturais e humanos frente aos efeitos da mudança do clima, são ações estratégicas para o desenvolvimento sustentável da agricultura. De maneira que essas ações devem ser específicas para um determinado local e contexto, não existindo uma abordagem única e genérica para reduzir os riscos em todas as situações (Pachauri; Meyer, 2014). Esse conceito amplo se aplica diretamente para as tecnologias que podem ser implementadas como medida de adaptação para os diferentes patossistemas, pois abordam a necessidade de ações específicas, levando em conta a diversidade existente na interação planta-patógeno.

As estratégias de adaptação no manejo de doenças são diversas e poderão contemplar: a seleção e desenvolvimento de cultivares resistentes às doenças; o manejo integrado com ênfase em controle biológico; as mudanças nas

práticas culturais; o uso de modelos de alerta e previsão; o desenvolvimento de novas moléculas com maior eficácia no controle de doenças em ambientes com aumento da temperatura; a alteração na data de semeadura para evitar a ocorrência da epidemia; a seleção de bioagentes com ampla faixa de ação em temperaturas altas; e a adoção de práticas de manejo como policultivos e rotação, entre outras (Figura 3) (Gupta et al., 2018; Pathak et al., 2018).

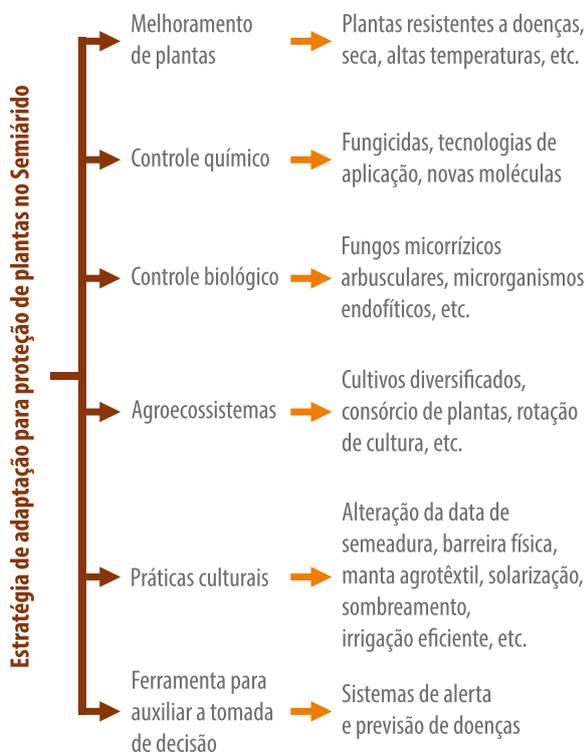


Figura 3. Estratégias de adaptação para a proteção de plantas frente às mudanças climáticas.

No melhoramento de plantas, o uso de tecnologias moleculares associadas ao melhoramento tradicional tem sido uma ferramenta potencial para aumentar a eficiência na obtenção de plantas resistentes às doenças (Spaldon et al., 2015; Pilet-Nayel et al., 2017). Essa técnica tem como vantagem uma seleção rápida, com redução no tamanho populacional para subseqüentes testes de campo, acelerando o desenvolvimento de cultivares tolerantes a estresses (Spaldon et al., 2015).

O manejo integrado de doenças envolve uma combinação de métodos de controle, como uso de cultivares resistentes, controle químico e biológico, práticas culturais, e etc. Essa estratégia pode ser empregada como uma medida de adaptação em longo prazo, com ênfase na prevenção de danos (Juroszek; Tiedemann, 2011). O monitoramento das doenças, baseado em limites de perda econômica, permite o desenvolvimento de sistemas de produção sustentáveis (Juroszek et al., 2008). Dessa maneira, o uso de sistemas de alerta e previsão apresenta-se como uma alternativa de adaptação, pois contribui para otimizar o uso de produtos químicos, indicando períodos de condições favoráveis ao desenvolvimento das doenças e determinando o momento adequado para as aplicações de fungicidas (Angelotti et al., 2012).

Ainda nesse contexto de manejo integrado, pode-se ter, como medida de adaptação, a adoção de agroecossistemas, por meio de sistemas de cultivos diversificados, com o estabelecimento de populações mistas de espécies vegetais para a redução dos riscos de epidemias. O consórcio ou o cultivo simultâneo de múltiplas espécies contribui para a redução de patógenos foliares, por meio de alterações no microclima (vento, temperatura e umidade), alterações na morfologia e fisiologia do hospedeiro e inibição direta de patógenos (Boudreau, 2013). Além do uso de consórcios, a rotação de culturas também pode contribuir para a redução do inóculo inicial de doenças causadas por fungos necrotróficos, podendo atrasar e reduzir as epidemias. Ao contrário, em condição de sistema de monocultivo e sem rotação de culturas, foi observada para a requeima da batata, causada por *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, a ocorrência precoce da doença e aumento na epidemia (Hannukkala et al., 2007).

A alteração das populações microbianas na rizosfera pode ser um indicativo de medida de adaptação, pois, ainda que os mecanismos sejam desconhecidos, técnicas que produzam ou até mesmo introduzam populações benéficas de microrganismos ao solo para promover o crescimento das plantas e a resistência a es-

tresses bióticos podem contribuir para a proteção de plantas. Destaca-se o potencial do uso de fungos micorrízicos arbusculares, que, além de atuarem como agentes de controle biológico, podem também aumentar a tolerância das plantas a estresses ambientais (Folli-Pereira et al., 2012). Os microrganismos endofíticos também têm sido utilizados como ferramentas para a proteção e para o estímulo dos mecanismos de defesa das plantas (Pieterse et al., 2014). Em razão das mudanças climáticas, o desafio da pesquisa será identificar e selecionar populações de bioagentes com ampla faixa de ação em altas temperaturas para que esses microrganismos continuem eficazes no controle de doenças de plantas. Isso poderá ser alcançado por meio de avanços tecnológicos como as análises metagenômicas (Riesenfeld et al., 2004; Kolton et al., 2017), que contribuem para elucidar a dinâmica, por exemplo, da microbiota do solo e de outros ambientes e identificar populações microbianas que sobrevivam em microclimas extremos e que tenham capacidade supressora às doenças de plantas. Esses microrganismos, além de atuarem na proteção, podem exercer o papel de promotores de crescimento das plantas.

Além do uso de microrganismos, algumas técnicas de manejo do solo, como a aplicação de biomassa carbonizada, têm apresentado resultados positivos na indução de resistência a patógenos foliares, como o *Botrytis cinerea* Pers. ex Fries em tomate (*Lycopersicon esculentum*), pimenta (*Capsicum annuum*) e morango (*Fragaria x ananassa* Duch.) (Elad et al., 2010; Meller Harel et al., 2012); *Podosphaera aphanis* (Wallr.) U. Braun et S. Takam. em morango (Meller Harel et al., 2012) e *Oidiopsis sicula* Scalia em pimenta e tomate (Graber et al., 2010); e também a patógenos radiculares, como *Fusarium oxysporum* (Smith) Snyder & Hansen em tomate (Jaiswal et al., 2018).

O controle químico, por meio do uso de fungicidas, é um dos métodos mais eficazes e utilizados para a proteção de plantas. Assim, a manutenção de sua eficiência também dependerá de algumas medidas de adaptação. A aplicação de fungicida no início da manhã permitiu uma

melhor deposição do produto, aumentando a eficiência do controle da podridão da haste, causada por *Sclerotium rolfsii* Sacc., em amendoim (*Arachis hypogaea*) (Augusto et al., 2010).

Em termos de barreira física, a manta agrotêxtil tem sido bastante utilizada para o controle de pragas no cultivo do melão no Nordeste brasileiro (Medeiros et al., 2007). Entretanto, o uso para o controle de patógenos foliares ainda é escasso. A manta agrotêxtil poderá ser uma técnica utilizada para evitar a entrada do patógeno como barreira física e também para alterar o microclima dos cultivos, podendo reduzir a incidência de algumas doenças de plantas. Outra tecnologia que poderá ser utilizada é a solarização, que consiste na desinfestação do solo objetivando o controle de fitopatógenos, por meio do uso de plástico transparente na cobertura do solo em pré-plantio (Ghini, 2014).

Estratégias ótimas de adaptação são aquelas que, por meio do manejo cuidadoso da terra, mantêm ou aumentam a resiliência e a estabilidade dos sistemas de produção (Rosenzweig; Tubiello, 2007). Nesse sentido, adicionalmente às diversas estratégias de adaptação agrícola às mudanças climáticas para o manejo de doenças de plantas, considerando a especificidade de cada patossistema (patógeno/planta hospedeira), é essencial também ter-se em conta a avaliação do impacto e as análises de custo-benefício dessas medidas para sua adoção e forma de implementação. Melhorar e fortalecer o capital humano, por meio de serviços de educação, divulgação e extensão, foi recomendado para alguns países da África (Akinngbe; Irohibe, 2014). Aplicar esse conhecimento visando ao aprimoramento da sustentabilidade de longo prazo no cenário das mudanças climáticas é o grande desafio atual e futuro.

Considerações finais

Os inúmeros impactos das mudanças climáticas sobre a interação planta-patógeno é um desafio para a proteção de plantas, principalmente em regiões semiáridas, que já convivem em

ambientes com altas temperaturas e déficit de água. Para lidar com essas condições adversas, essas regiões já adotam técnicas de manejo para o controle das doenças. Entretanto, esforços serão necessários para entender a diversidade dos diferentes patossistemas e readequar as práticas de manejo disponíveis, de maneira que continuem sendo eficazes no controle das doenças e evitem diminuição no rendimento dos cultivos.

A previsão dos impactos das mudanças climáticas sobre os fitopatógenos a longo prazo tem sido pouco estudada, principalmente para as regiões semiáridas, e os modelos climáticos de previsão ainda incluem altos níveis de incerteza, especialmente em relação às mudanças em escala regional. Assim, os impactos regionais precisarão de maior atenção da pesquisa para elucidar o surgimento de epidemias.

A adoção de estratégias integradas de manejo como medida de adaptação será possível a partir do conhecimento epidemiológico. Dessa maneira, as diferentes tecnologias integradas para proteger e prevenir a ocorrência de doenças, como o uso de cultivares resistentes, diversidade de espécies em sistemas de cultivo, sistemas de alerta e previsão de epidemias, entre outros, serão importantes medidas de controle para a proteção de plantas.

Referências

- AKINNAGBE, O. M.; IROHIBE, I. J. Agricultural adaptation strategies to climate change impacts in Africa: a review. **Bangladesh Journal of Agricultural Research**, v. 39, n. 3, p. 407-418, 2014. DOI: [10.3329/bjar.v39i3.21984](https://doi.org/10.3329/bjar.v39i3.21984).
- ANGELOTTI, F.; GAVA, C. A. T.; BATISTA, D. C.; FERNANDES, J. M. C.; PAVAN, W. **Sistema de alerta e previsão para doenças da videira**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2012. 36 p. (Embrapa Semiárido. Documentos, 251).
- ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; MAGALHAES, E.; GHINI, R.; GARRIDO, L. da R.; PEDRO JUNIOR, M. J. Climate change and the occurrence of downy mildew in Brazilian grapevines. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 6, p. 426-434, June 2017a. DOI: [10.1590/s0100-204x2017000600006](https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000600006).
- ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; PEIXOTO, A. R.; GARRIDO, L. da R. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica do cancro-bacteriano da videira no Brasil. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa, 2017b. p. 243-261.
- ARAÚJO, A. L. de S. **Impacto do aumento da temperatura e da concentração de CO2 sobre o oídio em meloeiro**. 2019. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental para o Semiárido) – Universidade de Pernambuco, Petrolina.
- AUGUSTO, J.; BRENNEMAN, T. B.; CULBREATH, A. K.; SUMNER, P. Night spraying peanut fungicides. II. Application timings and spray deposition in the lower canopy. **Plant Disease**, v. 94, p. 683-689, 2010. DOI: [10.1094/PDIS-94-6-0683](https://doi.org/10.1094/PDIS-94-6-0683).
- BENTLEY, J. W. Impact of IPM extension for smallholder farmers in the tropics. In: PESHIN R.; DHAWAN A. K. (ed.). **Integrated pest management: dissemination and impact**. Dordrecht: Springer, 2009. p. 333-346.
- BOUDREAU, M. A. Diseases in intercropping systems. **Annual Review Phytopathology**, v. 51, p. 499-519, Aug. 2013. DOI: [10.1146/annurev-phyto-082712-102246](https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102246).
- BRUNELLI, K. R.; KOBORI, R. F.; GIORIA, R. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças do melão no Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (ed.). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 129-139.
- COAKLEY, S. M.; SCHERM, H.; CHAKRABORTY, S. Climate change and plant disease management. **Annual Review of Phytopathology**, v. 37, p. 399-426, Sept. 1999. DOI: [10.1146/annurev.phyto.37.1.399](https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.37.1.399).
- CONCEIÇÃO, J. L. A.; ANGELOTTI, F.; PEIXOTO, A. R.; GHINI, R. Infection by *Xanthomonas campestris* pv. *viticola* under temperature increase and carbon dioxide concentrations. **Comunicata Scientiae**, v. 8, n. 2, p. 214-220, 2017. DOI: [10.14295/cs.v8i2.1779](https://doi.org/10.14295/cs.v8i2.1779).
- DAS, T.; MAJUMDAR, M. H.; DEVI, R.; RAJESH, T. Climate change impact on plant diseases. **SAARC Journal of Agriculture**, v. 14, p. 200-209, 2016. DOI: [10.3329/sja.v14i2.31259](https://doi.org/10.3329/sja.v14i2.31259).
- DESPREZ-LOUSTAU, M. L.; MARÇAIS, B.; NAGELEISEN, L. M.; PIOU, D.; VANNINI, A. Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. **Annals of Forest Science**, v. 63, n. 6, p. 597-612, Sept. 2006. DOI: [10.1051/forest:2006040](https://doi.org/10.1051/forest:2006040).
- ELAD, Y.; DAVID, D. R.; HAREL, Y. M.; BORENSHTEIN, M.; KALIFA, H. B.; SILBER, A.; RABER, E. R. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. **Phytopathology**, v. 100, p. 913-921, Aug. 2010. DOI: [10.1094/PHYTO-100-9-0913](https://doi.org/10.1094/PHYTO-100-9-0913).
- FOLLI-PEREIRA, M. S.; MEIRA-HADDAD, L. S.; BAZZOLLI, D. M. S.; KASUYA, M. C. M. Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1663-1679, nov./dez. 2012. DOI: [10.1590/S0100-06832012000600001](https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600001).

- GARRETT, K. A.; DENDY, S. P.; FRANK, E. E.; ROUSE, M. N.; TRAVERS, S. E. Climate change effects on plant disease: genomes to ecosystems. **Annual Review of Phytopathology**, v. 44, p. 489-509, sept. 2006. DOI: [10.1146/annurev.phyto.44.070505.143420](https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.070505.143420).
- GHINI, R. Climate change and increasing challenges for effective soil disinfection. **Acta Horticulturae**, n. 1044, p. 447-454, 2014. DOI: [10.17660/ActaHortic.2014.1044.61](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1044.61).
- GHINI, R.; BETTIOL, W.; HAMADA, E. Diseases in tropical and plantation crops as affected by climate changes: current knowledge and perspectives. **Plant Pathology**, v. 60, p. 122-132, Jan. 2011. DOI: [10.1111/j.1365-3059.2010.02403.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02403.x).
- GONÇALVES, F. J. T.; FREIRE, F. C. O.; LIMA, J. S.; MELO, J. G. M.; CÂMARA, M. P. S. Patogenicidade de espécies de Botryosphaeriaceae endofíticas de plantas da Caatinga do estado do Ceará em manga e umbu-cajá. **Summa Phytopathologica**, v. 42, n. 1, p. 43-52, jan./mar. 2016. DOI: [10.1590/0100-5405/2099](https://doi.org/10.1590/0100-5405/2099).
- GRABER, E. R.; MELLER HAREL, Y.; KOLTON, M.; CYTRYN, E.; SILBER, A.; RAV DAVID, D.; TSECHANSKY, L.; BORENSHTEIN, M.; ELAD, Y. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. **Plant and Soil**, v. 337, p. 481-496, 2010. DOI: [10.1007/s11104-010-0544-6](https://doi.org/10.1007/s11104-010-0544-6).
- GUPTA, S.; SHARMA, D.; GUPTA, M. Climate change impact on plant diseases: Opinion, trends and mitigation strategies. In: KASHYAP, P. L.; SRIVASTAVA, A. K.; TIWARI, S. P.; KUMAR, S. (ed.). **Microbes for climate resilient agriculture**. New York: John Wiley, 2018. p. 41-51.
- HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; GARRIDO, L. da R.; GHINI, R. Future scenarios of powdery mildew epidemic on grape under climate change for Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 454-470, 2015. DOI: [10.5935/1984-2295.20150007](https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150007).
- HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; GARRIDO, L. da R.; GHINI, R.; CARVALHO, M. C.; PALLADINO, R. P. Efeito das mudanças climáticas sobre a favorabilidade às podridões da uva madura e cinzenta da videira no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, p. 1100-1115, 2011.
- HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; GARRIDO, L. da R.; GHINI, R.; NOGUEIRA, S. M. C.; PEDRO JÚNIOR, M. J. Efeito das mudanças climáticas sobre a distribuição espacial da podridão amarga (*Greeneria uvicola*) da videira no Brasil. **Summa Phytopathologica**, v. 38, Feb. 2012. Suplemento. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/956342/1/RAHamadaEetalXXXVCongPltaFitopatologia099.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2018.
- HANNUKALA, A. O.; KAUKORANTA, T.; LEHTINEN, A.; RAHKONEN, A. Late blight epidemics on potato in Finland, 1933-2002: increased and earlier occurrence of epidemics associated with climate change and lack of rotation. **Plant Pathology**, v. 56, p. 167-176, Sept. 2007. DOI: [10.1111/j.1365-3059.2006.01451.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01451.x).
- JAISWAL, A. K.; ELAD, Y.; GRABER, E. R.; CYTRYN, E.; FRENKEL, O. Soil-borne disease suppression and plant growth promotion by biochar soil amendments and possible mode of action. **Acta Horticulturae**, n. 1207, p. 69-76, 2018. DOI: [10.17660/ActaHortic.2018.1207.9](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1207.9).
- JUROSZEK, P.; LUMPKIN, T. A.; PALADA, M. C. Sustainable vegetable production systems. **Acta Horticulturae**, n. 767, p. 133-49, 2008.
- JUROSZEK, P.; TIEDEMANN, A. V. Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. **Plant Pathology**, v. 60, p. 100-112, 2011. DOI: [10.1111/j.1365-3059.2010.02410.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02410.x).
- KASHYAP, P. L.; KUMAR, S.; SRIVASTAVA, A. K. Nanodiagnosics for plant pathogens. **Environmental Chemistry Letters**, v. 15, p. 7-13, 2017. DOI: [10.1007/s10311-016-0580-4](https://doi.org/10.1007/s10311-016-0580-4).
- KOLTON, M.; GRABER, E. R.; TSEHANSKY, L.; ELAD, Y.; CYTRYN, E. Biochar-stimulated plant performance is strongly linked to microbial diversity and metabolic potential in the rhizosphere. **New Phytologist**, v. 213, n.3, p. 1393-1404, 2017. DOI: [10.1111/nph.14253](https://doi.org/10.1111/nph.14253).
- MAGALHÃES, E. E. de; ANGELOTTI, F.; PEIXOTO, A. R.; FERNANDES, H. A. Impacto de alterações da temperatura sobre a infecção do oídio da videira. In: WORKSHOP SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS, 2012, Jaguariúna. **Mudanças climáticas e problemas fitossanitários: anais**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. 1 CD-ROM.
- MEDEIROS, J. F.; SANTOS, S. C. L.; CÂMARA, M. J. T.; NEGREIROS, M. Z. Produção de melão Cantaloupe influenciado por coberturas do solo, agrotêxtil e lâminas de irrigação. **Horticultura Brasileira**, v. 25, p. 538-543, out./dez. 2007. DOI: [10.1007/s10311-016-0580-4](https://doi.org/10.1007/s10311-016-0580-4).
- MELLER, H. Y.; ELAD, Y.; RAV-DAVID, D.; BORENSHTEIN, M.; SHULCHANI, R.; LEW, B.; GRABER, E. R. Biochar-induced systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. **Plant and Soil**, v. 357, p. 245-257, Aug. 2012. DOI: [10.1007/s11104-012-1129-3](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1129-3).
- OERKE, E. C. Crop losses to pests. **Journal of Agricultural Science**, v. 144, p. 31-43, Feb. 2006. DOI: [10.1017/S0021859605005708](https://doi.org/10.1017/S0021859605005708).
- OLIVEIRA, M. Z. A. de; PRATES JÚNIOR, P.; BARBOSA, C. de J.; ASSMAR, C. C. Fungo *Lasiodiplodia theobromae*: um problema para agricultura baiana. **Bahia Agrícola**, v. 9, n. 2, p. 24-29, mar. 2013.
- PACHAURI, R. K.; MEYER, L. (ed.). **Climate Change 2014: synthesis report**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. Acesso em: 11 set. 2019.
- PANDE, S.; SHARMA, M. Climate change and changing scenario of plant diseases in semi-arid tropics. In: THIND, T. S.; JAIN, R. K.; SHARMA, P.; KHURANA, S. M. P.;

- AGGARWAL, R.; SHARMA, R. K.; SINGH, D.; DUBEY, S. C.; KUMAR, A. (ed.). **Plant Pathology in India: Vision 2030**. New Delhi: Indian Phytopathological Society, 2011. p. 128-131.
- PANDE, S.; SHARMA, M. Climate change: potential impact on chickpea and pigeonpea diseases in the rainfed Semi-Arid Tropics (SAT). In: INTERNATIONAL FOOD LEGUMES RESEARCH CONFERENCE, 5.; EUROPEAN CONFERENCE ON GRAIN LEGUMES, 7., 2010, Antalya. **Annals [...]** Antalya: AEP, 2010.
- PATHAK, R.; SINGH, S. K.; TAK, A.; GEHLOT, P. Impact of climate change on host, pathogen and plant disease adaptation regime: a review. **Biosciences Biotechnology Research Asia**, v. 15, n. 3, p. 529-540, 2018. DOI: [10.13005/bbra/2658](https://doi.org/10.13005/bbra/2658).
- PIETERSE, C. M.; ZAMIOUDIS, C.; BERENDSEN, R. L.; WELLER, D. M.; WEES, S. C. V.; BAKKER, P. A. Induced systemic resistance by beneficial microbes. **Annual Review of Phytopathology**, v. 52, p. 347-375, Aug. 2014. DOI: [10.1146/annurev-phyto-082712-102340](https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102340).
- PILET-NAYEL, M. L.; MOURY, B.; CAFFIER, V.; MONTARRY, J.; KERLAN, M. C.; FOURNET, S.; DUREL, C. E.; DELOURME, R. Quantitative resistance to plant pathogens in pyramiding strategies for durable crop protection. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1-9, Oct. 2017. DOI: [10.3389/fpls.2017.01838](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01838).
- RIESENFELD, C.; SCHLOSS, P. D.; HANDELSMAN, J. Metagenomics: genomic analysis of microbial communities. **Annual Review Genetic**, v. 38, p. 525-552, July 2004. DOI: [10.1146/annurev.genet.38.072902.091216](https://doi.org/10.1146/annurev.genet.38.072902.091216).
- ROSENZWEIG, C.; TUBIELLO, F. N. Adaptation and mitigation strategies in agriculture: an analysis of potential synergies. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 12, p. 855-873, 2007. DOI: [10.1007/s11027-007-9103-8](https://doi.org/10.1007/s11027-007-9103-8).
- SANTANA, C. V. da S. **Interação entre fatores do ambiente e *Oidium* sp. em feijão-caupi**. 2013. 69 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias, Areia.
- SHARMA, M.; PANDE, S.; PATHAK, M.; RAO, J. N.; KUMAR, A.; REDDY, M.; BENAGI, V. I.; MAHALINGA, D. M.; ZHOTE, K. K.; KARANJKAR, P. N.; EKSINGHE, B. S. Prevalence of *Phytophthora* blight of pigeonpea in the Deccan Plateau of India. **The Plant Pathology Journal**, v. 22, n. 4, p. 309-313, Dec. 2006. DOI: [10.5423/PPJ.2006.22.4.309](https://doi.org/10.5423/PPJ.2006.22.4.309).
- SHARMA, M.; GHOSH, R.; PANDE, S. Dry root rot (*Rhizoctonia bataticola* (Taub.) Butler): an emerging disease of chickpea – where do we stand? **Archives of Phytopathology and Plant Protection**. v. 48, p. 13-16, July 2015. DOI: [10.1080/03235408.2016.1140564](https://doi.org/10.1080/03235408.2016.1140564).
- SHARMA, M.; MANGALA, U. N.; KRISHNAMURTHY, M.; VADEZ, V.; PANDE, S. Drought and dry root of chickpea. In: INTERNATIONAL FOOD LEGUMES RESEARCH CONFERENCE, 5.; EUROPEAN CONFERENCE ON GRAIN LEGUMES, 7., 2010, Antalya. **Annals [...]** Antalya: AEP, 2010.
- SINGH, C. K.; SUDHIR, I.; CHAND, R.; SHARMA, M. Variability in *Phytophthora drechsleri* f. sp. *cajani* and effect of temperature. **Journal of Pure and Applied Microbiology**, v. 11, p. 1053-1059, June 2017. DOI: [10.22207/JPAM.11.2.48](https://doi.org/10.22207/JPAM.11.2.48).
- SPALDON, S.; SAMNOTRA, R. K.; CHOPRA, S. Climate resilient technologies to meet the challenges in vegetable production. **International Journal of Current Research and Academic Review**, v. 3, n. 2, p. 28-47, Feb. 2015.

Condicionadores de solo como estratégia tecnológica à preservação

Potencialidade do uso de biocarvão em regiões semiáridas

Diana Signor Deon
Juliana Ribeiro Costa Pereira
Rogério Gonçalves de Oliveira

Introdução

A queima, ou pirólise, de biomassa na ausência de oxigênio leva à produção de vapores condensáveis, gases e carvão. Quando esse carvão é produzido especificamente para aplicação em solo, passa a ser denominado de “biocarvão”, material que apresenta potencial para melhorar a qualidade do solo, prevenir a lixiviação de nutrientes, promover o sequestro de carbono (C) ou depurar os efeitos de metais pesados e outros poluentes (Verheijen et al., 2009; Novotny et al., 2015; Shaaban et al., 2018). O biocarvão é um material promissor por apresentar benefícios agrônômicos, ambientais e econômicos (Shaaban et al., 2018), sendo, portanto, uma alternativa para desafios como a degradação dos solos, a insegurança alimentar, as mudanças climáticas, a geração de energia sustentável e o manejo de resíduos (Lehmann; Joseph, 2009).

A aplicação de biocarvão tem potencial para melhorar as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, bem como aumentar o rendimento das culturas. Em uma ampla revisão de literatura elaborada por Jeffery et al. (2011), a aplicação de biocarvão mostrou potencial para elevar a produtividade de diversas culturas, com aumento médio de 10%, sem a necessidade de ser reaplicado anualmente, como é necessário para os fertilizantes minerais e orgânicos (Suka-

torno et al., 2011). Entre os benefícios do uso de biocarvão como condicionador de solo estão: redução na densidade do solo, aumento na condutividade hidráulica saturada e do conteúdo de C no solo, aumento da disponibilidade de fósforo (P) às plantas, redução da lixiviação de nitrogênio (N), neutralização da acidez do solo, decréscimo na quantidade de alumínio (Al) extraível e redução significativa das emissões de gases causadores do efeito estufa pelos solos (Fowles, 2007; Steiner et al., 2007; Asai et al., 2009; Major et al., 2010; Brewer et al., 2011; Li et al., 2019).

O biocarvão também melhora a permeabilidade e a capacidade de retenção de água no solo e, portanto, pode aumentar a disponibilidade de água às plantas (Asai et al., 2009). A retenção de água e nutrientes é um dos principais benefícios fornecidos pela aplicação desse condicionador ao solo e está diretamente relacionada à presença de microporos, à hidrofiliabilidade e à sua grande superfície específica (Mangrich et al., 2015), demonstrando seu potencial principalmente para solos com textura arenosa, como é o caso de boa parte dos solos presentes na região semiárida do Brasil (Madari et al., 2006; Signor; Deon, 2017). Quando aplicado apenas na zona de influência das raízes, o biocarvão representa uma alternativa viável para as pequenas propriedades agrícolas, já que a quantidade necessária pode ser gerada no pró-

prio estabelecimento, evitando a entrada de insumos externos (Mulcahy et al., 2013).

Além disso, a aplicação de biocarvão é uma estratégia importante para promover o sequestro de C, pois representa um material com alto tempo de residência no solo. Os sistemas atuais de agricultura conservacionista, por exemplo, fornecem aumento de 2% a 20% das reservas de C do solo, por meio do incremento de substâncias húmicas (Steiner, 2010). Se a biomassa fosse convertida em biocarvão, esse aumento poderia chegar até 50% (Lehmann et al., 2006). Além das mudanças no solo para agricultura, por causa do seu alto poder de adsorção, vários estudos vêm sendo realizados com o uso de biocarvão para remediação de solos e águas contaminadas (Tang et al., 2013).

Além dos benefícios às plantas, ao solo e ao ambiente, outro aspecto importante da produção do biocarvão é sua associação com a produção de energia, o que configura seu uso como uma estratégia com benefícios ambientais integrados à produção de energia limpa, reciclagem de resíduos, estoques de C e funções ecossistêmicas (Biederman; Harpole, 2013; Novotny et al., 2015). Usinas de geração de energia a partir de resíduos como madeira, palha de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), resíduos culturais e lixo orgânico podem produzir tanto energia (gás e óleo) quanto biomassa carbonizada (biocarvão), que, por sua vez, pode ser usada como condicionador de solo, fazendo com que o biocarvão seja o elo entre o manejo de resíduos e a produção de energia limpa (Novotny et al., 2015).

Potencial do biocarvão como condicionador de solos

Todo solo pode ser afetado, de forma positiva ou negativa, pelo manejo e pelas práticas culturais a que está submetido, com consequente alteração da dinâmica e retenção de água e de nutrientes. Vários são os fatores que influenciam a disponibilidade de água às culturas, dentre os quais se destacam a estrutura, a textura, o tipo e a quantidade de argila e o teor de matéria orgânica (Klein; Libardi, 2000). A disponibilidade

de água para as culturas também pode ser alterada pela aplicação de condicionadores, como o biocarvão, por exemplo.

Segundo Novotny et al. (2015), relatos do efeito do uso de material carbonizado sobre o solo já são antigos para o Japão e a Europa e, nos últimos anos, diversos trabalhos têm mostrado que o uso do biocarvão como condicionador de solo pode melhorar o rendimento das culturas também em solos tropicais altamente intemperizados. Entretanto, ainda não está claro se os efeitos positivos desse material sobre as plantas devem-se à fertilização, ao aumento da capacidade de retenção de água ou a ambos. Também é incerto o tempo de influência do biocarvão sobre as culturas (Novotny et al., 2015; Xiao et al., 2016a; Li et al., 2018) e sobre atributos do solo (Zhou et al., 2017). Além disso, não há, até o momento, uma dose recomendada para cada cultura, como acontece para os fertilizantes ou corretivos como o calcário, por exemplo. Os trabalhos disponíveis na literatura testam doses de biocarvão que podem chegar a 200 Mg ha⁻¹ (Albuquerque et al., 2014).

Entretanto, os principais benefícios da aplicação do biocarvão sobre o solo são: aumento da produção de massa aérea das plantas, da produtividade das culturas, da nodulação de raízes por rizóbios, da concentração de potássio (K) no tecido foliar, da disponibilidade de P e K no solo, dos teores totais de N e C no solo, do pH do solo (Biederman; Harpole, 2013). Também há relatos de maior disponibilidade de nutrientes – N, P, cálcio (Ca) e enxofre (S) – e redução na sua lixiviação no solo, da toxidez por Al e por metais pesados; redução das emissões de gases de efeito estufa; aumento da capacidade de troca catiônica, da aeração e retenção de água no solo e do sequestro de C no solo (La tierra..., 2011). Li et al. (2019) mostram que o biocarvão pode reduzir entre 20,7% e 28,7% as emissões de gases causadores de efeito estufa. Por sua vez, Biederman e Harpole (2013) relatam que o biocarvão não apresenta efeito sobre a produção de biomassa radicular, sobre a relação entre biomassa aérea e radicular, sobre a porcentagem de colonização de micorrizas nas raízes

das plantas, sobre a concentração de N e P nos tecidos vegetais, bem como sobre o teor de N inorgânico no solo.

A seguir serão detalhados efeitos do biocarvão sobre o solo e sobre o rendimento de diversas culturas, com ênfase para trabalhos realizados em regiões semiáridas, bem como seus efeitos sobre o processo de compostagem de resíduos orgânicos.

Efeitos do biocarvão sobre o solo em regiões semiáridas

O Semiárido brasileiro está incluído no que a Convenção das Nações Unidas para Combate à Desertificação (UNCCD) classifica como “drylands”, locais onde a relação entre a precipitação anual e a evapotranspiração potencial varia de 0,05 a 0,65, o que engloba cerca de 40% das áreas do planeta, as quais se caracterizam pela grande variabilidade na quantidade e na intensidade das chuvas e por períodos prolongados de seca. Em um ano com precipitação abaixo da média, a ocorrência de chuvas no período de crescimento da cultura pode resultar em boas produções, enquanto grande quantidade de chuva na época em que a planta não necessita de água não irá se converter em boa produtividade (Koochafkan; Stewart, 2008). Por isso, a variabilidade temporal na distribuição das chuvas se configura em uma importante limitação às atividades agropecuárias na região semiárida.

Nos solos do Semiárido brasileiro, cuja capacidade de retenção de água, de maneira geral, não é elevada, além de precipitação pluviométrica limitada, concentrada e irregular, o uso do biocarvão pode ser uma prática viável, inclusive para os cultivos nas condições de sequeiro. Adicionalmente, a utilização do biocarvão também se destaca por apresentar uma forma estável da matéria orgânica, que proporciona mudanças em atributos como densidade, capacidade de retenção de água, textura, estrutura, porosidade, condutibilidade térmica, capacidade de troca catiônica (Carvalho, 2010), garantindo fertilidade por muito mais tempo e um maior número de microrganismos benéficos no solo.

Além disso, segundo Petter (2010) e Petter e Madari (2012), à medida que ocorre a oxidação parcial das bordas das estruturas aromáticas do biocarvão, novos sítios eletroquímicos vão surgindo, aumentando as cargas do solo e também a capacidade de trocas de cátions, a retenção e a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

De forma geral, Wang et al. (2019) sugerem que o biocarvão seja aplicado ao solo em partículas com diâmetro superior a 1 mm. Além disso, os autores mencionam que, em doses acima de 10 Mg ha⁻¹, o biocarvão pode melhorar a capacidade de retenção de água de solos de textura arenosa e favorecer sua resiliência durante períodos de estresse hídrico. Entretanto, as respostas à aplicação de biocarvão dependem do tipo de solo e de suas características. Signor e Deon (2017) avaliaram o efeito da adição de biocarvão sobre a retenção de água em um Argissolo e um Vertissolo do Semiárido brasileiro. Isso demonstra que o biocarvão aumentou os teores de água tanto no ponto de murcha permanente quanto na capacidade de campo em ambos os solos, embora os incrementos tenham sido mais evidentes no solo com menor teor de argila (Argissolo). Resultados semelhantes foram observados por Mangrich et al. (2015) ao avaliarem o efeito da aplicação de diferentes tipos de biocarvão – casca de coco-verde (*Cocus nucifera* L.), casca de laranja (*Citrus sinensis*), resíduo de óleo de palma (*Opuntia ficus-indica*), bagaço de cana-de-açúcar, aguapé (*Eichhornia crassipes*) – sobre dois Neossolos Quartzarênicos do estado de Sergipe. Nesse trabalho, a adição de 5% (massa/massa) de biocarvão aumentou a capacidade de retenção de água no solo entre 5,5% e 8% por causa da presença dos microporos na sua estrutura.

Xiao et al. (2016b) avaliaram os efeitos do biocarvão produzido a partir de palha de milho (*Zea mays*) sobre atributos físicos de um solo também cultivado com milho na região semiárida da China. Em função da grande porosidade do biocarvão, a densidade do solo foi reduzida (0,005 g cm⁻³ para cada megagrama por hectare de biocarvão aplicada) e a porosidade do solo aumentou linearmente por causa do uso do condicionador (0,2% na camada 0–10 cm e

0,1% na camada 10 cm–20 cm, para cada megagrama por hectare de biocarvão). Além disso, 2 anos após a aplicação do biocarvão, a condutividade hidráulica e a capacidade de retenção de água na camada 0–10 cm do solo aumentaram em relação ao tratamento controle, sendo que o conteúdo de água disponível entre o ponto de murcha e a capacidade de campo aumentou de 13,5% para 14,9% (Xiao et al., 2016b). Pandian et al. (2016) também demonstraram que a aplicação de 5 Mg ha⁻¹ de biocarvão é capaz de reduzir em 3,5% a densidade do solo (de 1,41 g cm⁻³ para 1,36 g cm⁻³) e aumentar a umidade do solo em 2,5%. Liang et al. (2014) aplicaram 90 Mg ha⁻¹ de biocarvão em um solo calcário e observaram redução na densidade do solo após 3 anos da aplicação.

Devereux et al. (2013) avaliaram a capacidade potencial do biocarvão em melhorar a retenção de água em um Luvissole e constataram que o tamanho médio dos poros diminuiu de 0,07 mm², no tratamento sem biocarvão, para 0,046 mm², no tratamento com 5% (massa/massa) de biocarvão no solo. Também foi observado que o biocarvão aumenta a retenção de água em solos propensos a períodos de seca.

Xiao et al. (2016b) observaram ainda que, após eventos de chuva, o conteúdo de água no solo foi significativamente maior nos tratamentos com aplicação de biocarvão em comparação ao tratamento controle, indicando que o biocarvão pode manter o solo mais úmido, reduzindo as taxas de evaporação e garantindo a disponibilidade de água para as plantas. Além disso, o aumento da porosidade e da condutividade hidráulica na camada superficial, promovidos pelo biocarvão, fez com que ocorresse maior fluxo de água da chuva para o subsolo, aumentando a quantidade de água armazenada no perfil. Isso garante melhores condições para o desenvolvimento das culturas e, conseqüentemente, maior cobertura de dossel, que, por sua vez, promove maior cobertura e sombreamento do solo e reduz a evaporação de água. Por esses motivos, Xiao et al. (2016b) afirmam que a retenção de água promovida pelo biocarvão

pode contribuir para mitigar o problema das chuvas irregulares em regiões semiáridas.

Novak et al. (2009), trabalhando com solos da planície costeira dos Estados Unidos (solos arenosos, ácidos, com baixo teor de C e baixa capacidade de troca de cátions), avaliaram a influência da adição de biocarvão de casca de noz-pecã (*Carya illinoensis*) sobre a fertilidade do solo. Aos 67 dias de incubação em casa de vegetação, os autores constataram que o biocarvão aumentou o pH do solo, os teores de C orgânico total, Ca, K, manganês (Mn) e P, e diminuiu a acidez trocável do solo. O biocarvão apresentou ainda uma alta capacidade de sorção de nutrientes, principalmente Ca, P, zinco (Zn) e Mn. Após a aplicação de 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão produzido a partir de resíduos das indústrias de celulose, Zwieten et al. (2010), em experimento em casa de vegetação em um Latossolo, também observaram aumento de pH, capacidade de troca de cátions, K, Ca e C e redução do Al trocável. Liang et al. (2014) também constataram que houve um aumento no pH do solo, do teor de K trocável e da capacidade de retenção de água depois de 3 anos da aplicação do biocarvão em um solo calcário.

Li et al. (2018) trabalharam com a aplicação de biocarvão produzido a partir de palha de milho em ambiente Semiárido na China, testando as doses de 0 Mg ha⁻¹, 10 Mg ha⁻¹, 20 Mg ha⁻¹, 40 Mg ha⁻¹ e 60 Mg ha⁻¹, bem como também observaram redução na densidade do solo e aumento na porosidade e condutividade elétrica do solo em função do aumento da dose de biocarvão. Entretanto, nessas condições, o pH do solo não foi afetado pelo biocarvão após um ciclo de cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*). Entretanto, há que se levar em conta que o efeito do biocarvão sobre o pH do solo depende tanto da condição inicial do pH do solo quanto do pH do biocarvão, de forma que solos ácidos respondem melhor que solos alcalinos e biocarvões com pH alcalinos são mais eficientes que biocarvões ácidos (Biederman; Harpole, 2013).

Xiao et al. (2016a) também investigaram os efeitos de biocarvão sobre solo cultivado com milho no Semiárido da China e observaram que,

em apenas 6 meses, a aplicação de 30 Mg ha⁻¹ de biocarvão reduziu em 12% a densidade do solo e aumentou a porosidade total em 13% na camada 0–10 cm. Além disso, o biocarvão aumentou os teores de C orgânico, N total, relação C/N, teores de P e K disponíveis no solo ao final do ciclo de cultivo. Os pesquisadores observaram que esses efeitos sobre o solo perduraram por pelo menos 2 anos após a aplicação do biocarvão, sugerindo seu efeito promissor como condicionador de solos para a região semiárida (Xiao et al., 2016a).

Em condições controladas, alterações nos atributos biológicos do solo (biomassa microbiana, atividade microbiana e quociente metabólico) também dependem do tipo de solo e são mais evidentes em solos com baixo teor de C orgânico, menos férteis e mais arenosos (Kolb et al., 2009). Zhou et al. (2017) fizeram um extenso trabalho de meta-análise sobre os efeitos do biocarvão em atributos biológicos do solo e observaram tendência de aumento de 25% nos teores de C e N na biomassa microbiana do solo e uma redução de 13% no quociente metabólico dos solos em função da aplicação de biocarvão. Pandian et al. (2016) também mostraram diferenças nas populações de bactérias, fungos e actinomicetos por causa do uso de biocarvão em um solo no trópico Semiárido. Além disso, a eficiência de uso de N, P e K aumentou na presença do biocarvão, o que também foi observado por Zwieten et al. (2010). Entretanto, ainda há necessidade de condução de experimentos de longa duração no campo para monitorar, além de outros atributos do solo, também as alterações em processos microbianos em função do uso de biocarvão em áreas agrícolas (Zhou et al., 2017).

Efeitos do biocarvão sobre as plantas em regiões semiáridas

As propriedades do biocarvão fazem desse material um condicionador eficiente para aumento da retenção e disponibilização de água e nutrientes para as plantas, tendo efeito também sobre a redução da taxa de evapotranspiração,

a complexação de metais pesados e a redução dos efeitos da salinidade do solo sobre as culturas (Ekebafe et al., 2013), melhorando significativamente o crescimento, a nutrição das plantas e, conseqüentemente, a produtividade das espécies cultivadas (Steiner et al., 2007). As pesquisas sobre o uso de biocarvão para aumentar o rendimento das culturas foram significativamente intensificadas nos últimos anos, o que se deve a dois fatores: a) os estudos sobre as Terras Pretas de Índio, na Amazônia, os quais sugerem que a elevada fertilidade desses solos está relacionada ao carbono de origem pirogênica; b) a carbonização de biomassa ou resíduos orgânicos para produção de bioenergia, a qual gera como subproduto o biocarvão (Novotny et al., 2015).

De maneira geral, a utilização do biocarvão em sistemas de produção resulta em um aumento médio de 10% na produtividade de diversas culturas (Jeffery et al., 2011).

Entretanto, os incrementos de produtividade podem ser muito maiores, como relatados em outras situações. Pandian et al. (2016), por exemplo, trabalhando no trópico Semiárido, observaram aumento de 29% na produtividade de amendoim (*Arachis hypogaea*) de sequeiro por causa da aplicação de biocarvão. Yamato et al. (2006) observaram, na Indonésia, que a produtividade de milho aumentou 25% com relação ao tratamento controle graças à aplicação de 25 Mg ha⁻¹ de biocarvão de casca de acácia (*Acacia mangium*). Em um experimento com 3 anos de duração, Xiao et al. (2016b), avaliando a aplicação de 20 t ha⁻¹ de biocarvão de palha de milho, observaram aumentos de 14,2% na produtividade do milho e de 12,3% na eficiência do uso da água por essa cultura. Esse experimento foi realizado no Semiárido da China, região com precipitação e evapotranspiração médias de 555 mm e 1.565 mm, respectivamente, condição climática semelhante àquelas de alguns locais do Semiárido brasileiro. Destaca-se ainda que a produtividade de milho, na dose de 10 Mg ha⁻¹, foi similar à do controle e que, portanto, a dose de biocarvão indicada para essas condições de cultivo deve ser superior a este valor.

Contudo, o efeito do biocarvão sobre as culturas também depende da espécie vegetal em questão e da fase do ciclo fenológico. Biederman e Harpole (2013) mostraram que o biocarvão aumenta a produção de biomassa no sistema radicular em culturas de ciclo anual, mas não tem esse mesmo efeito em culturas perenes. Wang et al. (2016) mostraram que os efeitos positivos do biocarvão sobre o desenvolvimento das plantas não aparecem no início do desenvolvimento, tornando-se evidentes apenas a partir da metade do ciclo de crescimento da cultura. Além disso, há variação em função do local de aplicação, sendo os maiores efeitos observados em regiões de clima tropical do que no clima temperado (Biederman; Harpole, 2013) e em solos ácidos e neutros, com texturas de média a arenosa (Zwieten et al., 2010; Smebye et al., 2016).

Oliveira (2016) trabalhou com a aplicação de diferentes doses de biocarvão em um Argissolo do Semiárido brasileiro e observou seus efeitos sobre o desenvolvimento e a produtividade de capim-buffel (*Cenchrus ciliates* L.), guandu (*Cajanus cajan*) e sorgo (*Sorghum bicolor* L.) em duas condições de umidade (100% e 30% da capacidade de campo). Nesse trabalho, o aumento da dose de biocarvão aumentou a produção de matéria seca apenas do guandu. Entretanto, o aumento da dose de biocarvão aumentou os teores de Ca e de P na parte aérea das plantas de capim-buffel e sorgo.

Li et al. (2018) também avaliaram o efeito do biocarvão produzido a partir de restos culturais de milho sobre a produtividade de tomateiro no Semiárido da China e observaram aumento quadrático na produção em função da dose de biocarvão aplicada ao solo, sendo a dose de 30 Mg ha⁻¹ a que apresentou melhor relação custo-benefício.

Xiao et al. (2016a) também estudaram o efeito de doses crescentes de biocarvão (0 Mg ha⁻¹, 10 Mg ha⁻¹, 20 Mg ha⁻¹ e 30 Mg ha⁻¹) sobre a cultura do milho no norte da China e observaram maior desenvolvimento do sistema radicular, resultando em maiores taxas de crescimento, produção de biomassa e de grãos e maior ab-

sorção de N, P e K pelas plantas. Na avaliação de quatro safras consecutivas, Steiner et al. (2007) relatam que o uso de biocarvão associado com fertilização mineral proporcionou quase o dobro da produção de arroz (*Oryza sativa* L.) e sorgo em relação ao uso de fertilizantes minerais. Possivelmente, esse efeito está relacionado ao maior desenvolvimento radicular e à maior absorção de nutrientes, como relatado por Xiao et al. (2016a), o que aumenta a eficiência de uso dos fertilizantes, conforme relatado por Xiao et al. (2016b) e por Biederman e Harpole (2013), que afirmam que o biocarvão é mais eficiente que a fertilização para aumentar os teores de P e K no tecido vegetal, pois aumenta a disponibilidade desses nutrientes no solo ao mesmo tempo que reduz as perdas por lixiviação.

Wang et al. (2016) avaliaram o efeito de biocarvão produzido a partir de colmo de milho sobre a produtividade de feijão-mungo-verde (*Vigna radiata* L.) em um solo arenoso (13% de argila), no Semiárido da China, e observaram um aumento de 53% na produtividade desse tipo de feijão em função da aplicação de 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão (1.106,70 kg ha⁻¹) em relação ao tratamento controle (724,60 kg ha⁻¹). Além disso, Wang et al. (2016) também mostraram que o biocarvão potencializa os efeitos do composto aplicado como fonte de nutrientes ao solo. A aplicação de 20 Mg ha⁻¹ de composto produzido a partir de dejetos suínos aumentou em 87% a produtividade de *V. radiata*, enquanto a mistura de 20 Mg ha⁻¹ de composto com 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão elevou em 135% a produtividade.

Além disso, apesar da carência de estudos de longo prazo, os incrementos de produtividade como resultado da aplicação do biocarvão ao solo parecem ser mais duradouros que os de outros condicionadores. Sukatorno et al. (2011) avaliaram a aplicação do biocarvão e de esterco sobre a produção de milho em solos arenosos da Indonésia e observaram que, no primeiro ano de cultivo, as produtividades foram semelhantes nos tratamentos com esterco e com o biocarvão. Entretanto, com a aplicação apenas no primeiro ano, na safra subsequente a produtividade de milho foi menor na área que rece-

beu apenas o esterco, mas manteve-se similar à da safra anterior para os tratamentos com biocarvão. Esses resultados demonstram que o biocarvão não precisa ser reaplicado anualmente para garantir uma produtividade satisfatória de milho para aquela região, ao contrário do esterco. Em região semiárida da China, a eficiência de uso da água pela cultura do milho não foi afetada no primeiro ano após a aplicação do biocarvão ao solo, mas foi maior em função do biocarvão no segundo e no terceiro ano após a aplicação (Xiao et al., 2016b), comprovando que os efeitos do biocarvão são duradouros e melhoram ao longo do tempo.

Uso de biocarvão no processo de compostagem

A compostagem de resíduos orgânicos é uma importante estratégia para aplicação de matéria orgânica no solo, pois garante a aplicação de resíduos mais humificados, em comparação com o resíduo orgânico original, bem como maior tempo de residência no solo. Todavia, uma desvantagem do processo de compostagem é a perda de nutrientes, principalmente de N. O biocarvão é apontado como um aditivo capaz de minimizar o odor, as perdas de N e a mobilidade de metais pesados, como cobre (Cu) e Zn, bem como reduzir a emissão de gases de efeito estufa durante o processo de compostagem (Hua et al., 2009; Dias et al., 2010; Sanchez-Monedero et al., 2018).

Hua et al. (2009) mostraram que a adição de 9% de biocarvão à pilha de compostagem é capaz de reduzir em 64,1% as perdas de N. Além disso, a capacidade de redução nas perdas de N é diretamente proporcional à dose de biocarvão na pilha de compostagem (Sanchez-Monedero et al., 2018). Os principais mecanismos relacionados às menores perdas de N na compostagem com biocarvão são: a capacidade de adsorção de NH_3 e de NH_4^+ nos poros do biocarvão, evitando a conversão a NH_3 e reduzindo, portanto, as perdas gasosas dessa forma de N; a redução na mineralização de N por causa da retenção

de compostos nitrogenados no biocarvão; em decorrência da maior aeração da pilha de compostagem promovida pelo biocarvão, há favorecimento do processo de nitrificação e redução das perdas de N por desnitrificação (principalmente de N_2O , um gás causador de efeito estufa) (Sanchez-Monedero et al., 2018).

Além disso, durante a compostagem, o biocarvão favorece a atividade microbiana e aumenta a temperatura na fase termofílica da compostagem, o que reduz o tempo para a estabilização do material final (Sanchez-Monedero et al., 2018). Zhang et al. (2014) observaram que o biocarvão aumentou a proporção de ácidos fúlvicos e ácidos húmicos durante a compostagem de lodo de esgoto. Dias et al. (2010) também observaram que a adição de biocarvão durante a compostagem de esterco de galinha permitiu que o produto final apresentasse substâncias húmicas altamente polimerizadas, o que é extremamente desejável para a obtenção de compostos de boa qualidade. Adicionalmente, durante o processo de compostagem, a oxidação leva ao desenvolvimento de maior quantidade de grupos funcionais na superfície do biocarvão, o que aumenta sua capacidade de troca de cátions e sua porosidade, potencializando a retenção de nutrientes e a sorção de compostos orgânicos (Sanchez-Monedero et al., 2018).

Portanto, pode-se dizer que a compostagem com adição de biocarvão permite unir em um só produto os benefícios amplamente conhecidos do composto orgânico e os efeitos positivos do biocarvão (Zhang et al., 2014). Além disso, o biocarvão é o substrato ideal para reduzir a duração do processo de compostagem e aumentar o valor do composto produzido (Sanchez-Monedero et al., 2018). De forma geral, Sanchez-Monedero et al. (2018) indicam que a dose ideal de biocarvão para otimizar o processo de compostagem é de 10% com base na matéria seca. No entanto, a granulometria ideal do biocarvão para o processo de compostagem ainda necessita ser definida e a ampla adoção do biocarvão no processo produtivo de compostos orgânicos requer a validação em experimentos de larga escala.

Processo produtivo do biocarvão

Diversos tipos de matéria-prima, tanto de origem agrícola quanto industrial, podem ser usados para a produção do biocarvão: cascas, bagaços, sementes, palha, ramos, serragem, camas de animais, etc., ou seja, materiais com diferentes composições químicas, as quais afetarão o processo produtivo e a qualidade do biocarvão (Novotny et al., 2015). Graças ao seu baixo custo, os resíduos de processos agrícolas são as matérias-primas mais comuns utilizadas na pirólise para a produção de biocarvão (Verheijen et al., 2009).

O biocarvão não é um produto padrão, pois suas características, como reatividade, hidrofobicidade e estrutura, variam de acordo com o processo de queima (tipo de pirólise, temperatura, tempo de retenção, adição de oxigênio), com o tipo e a granulometria da biomassa (Madari et al., 2010; Brewer et al., 2011). De forma geral, a produção de biocarvão é favorecida quando a pirólise ocorre em baixa temperatura e com baixa taxa de aquecimento, bem como quando o tamanho das partículas e o teor de lignina do material de origem são elevados (Demirbas, 2004). A composição química da biomassa determina a qualidade do biocarvão e afeta sua dinâmica no solo (Nguyen et al., 2010), podendo aumentar ou reduzir o tempo de residência no solo, de forma que materiais ricos em lignina, por exemplo, produzem biocarvões considerados de melhor qualidade (Novotny et al., 2015).

Durante o processo de pirólise, em temperaturas mais baixas, próximas a 100 °C, ocorre apenas desidratação do material e a estrutura química do material de origem não se altera. Com o aumento da temperatura, a desidratação aumenta e os polímeros presentes na estrutura do material de origem começam a se quebrar, levando à formação de alguns compostos voláteis. Quando a temperatura aumenta ainda mais, aumenta a formação de unidades poliaromáticas e o carvão se enriquece em resíduos de lignina resistentes ao calor. Em temperaturas

de até 700 °C, o espaço poroso no carvão vai aumentando gradativamente, enquanto alguns componentes voláteis não condensáveis ficam retidos (Keiluweit et al., 2010). Portanto, o aumento da temperatura de pirólise (até 700 °C) reduz a produção de carvão e aumenta a produção de gás, gerando um material com maior porosidade (Ertas; Alma, 2010) e com área superficial até três vezes maior que a matéria-prima (Song et al., 2014).

De maneira geral, em temperaturas superiores a 250 °C, há uma redução gradual na produtividade de carvão e um aumento relativo no teor de C fixo. Assim, mais material é perdido na forma de material volátil, diminuindo a produtividade de carvão em função da quantidade de material inicialmente carbonizado, e, proporcionalmente, o carvão produzido torna-se mais enriquecido em C fixo à medida que a temperatura aumenta. Isso ocorre até aproximadamente 700 °C. Para temperaturas de produção acima desse valor, a produtividade de carvão passa a ser constante.

Com relação à qualidade química do biocarvão, independente da matéria-prima utilizada, o aumento da temperatura de carbonização diminui a proporção de grupos funcionais alifáticos e de cadeias C=O e aumenta a proporção de grupos OH (Nguyen; Lehmann, 2009). Além disso, biocarvões produzidos em temperaturas de até 350 °C, os mais desejáveis para aplicação como condicionador de solo, são menos estáveis e possuem menor tempo de residência no solo em comparação a materiais carbonizados a temperaturas mais elevadas (600 °C) (Nguyen et al., 2010).

Considerações finais

As regiões semiáridas apresentam grandes limitações às atividades agrícolas por causa das condições edafoclimáticas que caracterizam esses ambientes, como elevada evapotranspiração, baixa precipitação e elevadas taxas de decomposição da matéria orgânica do solo. Embora a pecuária seja menos susceptível e represente uma atividade econômica importante nesses

locais, ainda assim a segurança alimentar dos rebanhos é um grande desafio. No caso do Semi-árido brasileiro, mesmo nas áreas irrigadas onde a disponibilidade de água não é fator limitante, os solos geralmente apresentam baixo teor de matéria orgânica e baixa capacidade de retenção de nutrientes. O uso de adubos orgânicos e de compostos é elevado nas áreas de agricultura irrigada no Semiárido brasileiro, onde as altas taxas de decomposição nesses ambientes quentes e úmidos levam à necessidade de grandes doses e de reaplicação frequente desses insumos. Nesse contexto, o biocarvão apresenta-se como um condicionador de solos de grande potencial para essas regiões, pois aumenta a retenção de água e nutrientes no solo, com efeitos duradouros em comparação a outros materiais.

Um desafio para as regiões semiáridas implementarem o uso de biocarvão como condicionador de solos é a disponibilidade de matéria-prima. Entretanto, uma vantagem do biocarvão é a não necessidade de reaplicação anual, reduzindo custos de aquisição, produção e aplicação. A busca por matérias-primas para a produção do biocarvão deve passar, portanto, pelo reaproveitamento de resíduos ou por estratégias de manejo de espécies florestais cultivadas, garantindo a sustentabilidade da utilização dessa prática.

Referências

- ALBUQUERQUE, J. A.; CALERO, J. M.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CAMPILLO, M. C.; GALLARDO, A.; VILLAR, R. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, n. 1, p. 16-25, 2014.
- ASAI, H.; SAMSON, B. K.; STEPHAN, H. M.; SONGYIKHANGSUTHOR, K.; HOMMA, K.; KIYONO, Y.; INOUE, Y.; SHIRAIWA, T.; HORIE, T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. **Field Crops Research**, v. 111, n. 1/2, p. 81-84, Mar. 2009. DOI: [10.1016/j.fcr.2008.10.008](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.008).
- BIEDERMAN, L. A.; HARPOLE, W. S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 202-214, 2013. DOI: [10.1016/j.fcr.2008.10.008](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.008).
- BREWER, C. E.; UNGER, R.; SCHIMIDT-ROHR, K.; BROWN, R. C. Criteria to select biochars for field studies based on biochar chemical properties. **Bioenergy Research**, v. 4, n. 4, p. 312-323, 2011.
- CARVALHO, E. R. **Fertilizante mineral e resíduo orgânico sobre características agrônômicas da soja e nutrientes no solo**. 2010. 56 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- DEMIRBAS, A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 72, n. 2, p. 243-248, Nov. 2004. DOI: [10.1016/j.jaap.2004.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.003).
- DEVEREUX, R. C.; STURROCK, C. J.; MOONEY, S. J. The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth. **Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh**, v. 103, n. 1, p. 13-18, 2013. DOI: [10.1017/S1755691012000011](https://doi.org/10.1017/S1755691012000011).
- DIAS, B. O.; SILVA, C. A.; HIGASHIKAWA, F. S.; ROIG, A.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A. Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 4, p. 1239-1246, Feb. 2010. DOI: [10.1016/j.biortech.2009.09.024](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.024).
- EKEBAFE, M. O.; EKEBAFE, L. O.; MALIKI, M. Utilisation of biochar and superabsorbent polymers for soil amendment. **Science Progress**, v. 96, n. 1, p. 85-94, Mar. 2013. DOI: [10.3184/003685013X13587941096281](https://doi.org/10.3184/003685013X13587941096281).
- ERTAS, M.; ALMA, M. H. Pyrolysis of laurel (*Laurus nobilis* L.) extraction residues in a fixed-bed reactor: Characterization of bio-oil and bio-char. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 88, n. 1, p. 22-29, May 2010. DOI: [10.1016/j.jaap.2010.02.006](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.02.006).
- FOWLES, M. Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy. **Biomass & Bioenergy**, v. 31, n. 6, p. 426-432, June 2007. DOI: [10.1016/j.biombioe.2007.01.012](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.01.012).
- HUA, L.; WU, W.; LIU, Y.; MCBRIDE, M. B.; CHEN, Y. Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 16, n. 1, p. 1-9, Jan. 2009. DOI: [10.1007/s11356-008-0041-0](https://doi.org/10.1007/s11356-008-0041-0).
- JEFFERY, S.; VERHEIJEN, F. G. A.; VELDE, M. van der; BASTOS, A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 144, n. 1, p. 175-187, 2011. DOI: [10.1016/j.agee.2011.08.015](https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015).
- KEILUWEIT, M.; NICO, P. S.; JOHNSON, M. G.; KLEBER, M. Dynamic molecular structure of plant-derived black carbon (biochar). **Environmental Science Technology**, v. 44, n. 4, p. 1247-53, 2010. DOI: [10.1021/es9031419](https://doi.org/10.1021/es9031419).
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. A faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação

com a densidade do solo ao longo de um perfil de um Latossolo roxo. **Ciência Rural**, v. 30, n. 6, p. 959-964, nov./dez. 2000. DOI: [10.1590/S0103-84782000000600006](https://doi.org/10.1590/S0103-84782000000600006).

KOLB, S. E.; FERMANICH, K. J.; DORNBUSH, M. E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 4, p.1173-1181, July 2009. DOI: [10.2136/sssaj2008.0232](https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0232).

KOOHAFKAN, P.; STEWART, B. A. Drylands, people and land use. In: KOOHAFKAN, P.; STEWART, B. A. **Water and cereals in drylands**. Rome: FAO, 2008. p. 5-16.

LA TIERRA: una capa viviente. **Tunza**, v. 9, n. 2, p. 12-13, 2011.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, n. 2, p. 403-427, 2006. DOI: [10.1007/s11027-005-9006-5](https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5).

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science and technology**. London: Earthscan, 2009. 448 p.

LI, B.; ZHOU, J.; LU, Y.; XIONG, Z. Field-aged biochar reduces the greenhouse gas balance in a degraded vegetable field treated by reductive soil desinfestation. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 10609-10620, 2019. DOI: [10.1007/s11356-019-04130-4](https://doi.org/10.1007/s11356-019-04130-4).

LI, C.; XIONG, Y.; QU, Z.; XU, X.; HUANG, Q.; HUANG, G. Impact of biochar addition on soil properties and water-fertilizer productivity of tomato in semi-arid region of Inner Mongolia, China. **Geoderma**, v. 331, n. 1, p. 100-108, Dec. 2018. DOI: [10.1016/j.geoderma.2018.06.014](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.06.014).

LIANG, F.; LI G.; LIN Q.; ZHAO, X. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 525-532, Mar. 2014. DOI: [10.1016/S2095-3119\(13\)60708-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60708-X).

MADARI, B. E.; COSTA, A. R.; CASTRO, L. M.; SANTOS, J. L. S.; BENITES, V. de M.; ROCHA, A. O.; MACHADO, P. L. O. **A. Carvão vegetal como condicionador de solo para Arroz de Terras Altas (Cultivar Primavera): um estudo prospectivo**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 6 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado técnico 125).

MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V. D. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. de A. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. (ed.). **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2010. p. 173-189.

MAJOR, J.; RONDON, M.; MOLINA, D.; RIHA, S.; LEHMANN, J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar

application to a Colombian savanna oxisol. **Plant and Soil**, v. 333, n. 1, p. 117-128, 2010. DOI: [10.1007/s11104-010-0327-0](https://doi.org/10.1007/s11104-010-0327-0).

MANGRICH, A. S.; CARDOSO, E. M. C.; DOUMER, M. E.; ROMÃO, L. P. C.; VIDAL, M.; RIGOL, A.; NOVOTNY, E. H. Improving the water holding capacity of soils of Northeast Brazil by biochar augmentation. In: AHUJA, S.; ANDRANDE, J. B.; DIONYSIOU, D. D.; HRISTOVSKI, K. D.; LOGANATHAN, B. G. (ed.). **Water challenges and solutions on a global scale**. Washington, DC: American Chemical, 2015, p. 339-354.

MULCAHY, D. N.; MULCAHY, D. L.; DIETZ, D. Biochar soil amendment increases tomato seedling resistance to drought in sandy soils. **Journal of Arid Environments**, v. 88, n. 1, p. 222-225, Jan. 2013. DOI: [10.1016/j.jaridenv.2012.07.012](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.07.012).

NGUYEN, B. T.; LEHMANN, J. Black carbon decomposition under varying water regimes. **Organic Geochemistry**, v. 40, p. 846-853, Aug. 2009. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2009.05.004](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.05.004).

NGUYEN, B. T.; LEHMANN, J.; HOCKADAY, W. C.; JOSEPH, S.; MASIELLO, C. A. Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation. **Environmental Science and Technology**, v. 44, p. 3324-3331, 2010. DOI: [10.1021/es903016y](https://doi.org/10.1021/es903016y).

NOVAK, J. M.; BUSSCHER, W. J.; LAIRD, D. L.; AHMEDNA, M.; WATTS, D. W.; NIANDOU, M. A. S. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. **Soil Science**, v. 174, n. 2, p. 105-112, 2009. DOI: [10.1097/SS.0b013e3181981d9a](https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181981d9a).

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. Biochar: Pyrogenic carbon for agricultural use: a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321-344, Mar./Apr. 2015. DOI: [10.1590/01000683rbc20140818](https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140818).

OLIVEIRA, R. G. de. **Uso do biocarvão como condicionador de solos no cultivo de plantas forrageiras**. 2016. 73 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

PANDIAN, K.; SUBRAMANIYAN, P.; GNASEKARAN, P.; CHITRAPUTHIRAPILLAI, S. Effects of biochar amendment on soil physical, chemical and biological properties and groundnut yield in rainfed Alfisol of semi-arid tropics. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 62, n. 9, p. 1293-1310, 2016. DOI: [10.1080/03650340.2016.1139086](https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1139086).

PETTER, F. A. **Biomassa carbonizada como condicionador de solo: aspectos agrônomicos e ambientais do seu uso em solos de cerrado**. 2010. 130 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; SILVA, M. A. S.; CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, M. T.; MARIMON JÚNIOR, B. H.; PACHECO, L. P. Soil fertility and upland rice yield after biochar application in the Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 5, p. 699-706, 2012. DOI: [10.1590/S0100-204X2012000500010](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000500010).

- REHRAH, D.; BANSODE, R. R.; HASSAN, O.; AHMEDNA, M. Physico-chemical characterization of biochars from solid municipal waste for use in soil amendment. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 118, n. 1, p. 42-53, Mar. 2016. DOI: [10.1016/j.jaap.2015.12.022](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.12.022).
- SANCHEZ MONEDERO, M. A.; CAYUELA, M. L.; ROIG, A.; JINDO, K.; MONDINI, C.; BOLAN, N. Role of biochar as an additive in organic waste composting. **Bioresource Technology**, v. 247, n. 1, p. 1155-1164, Jan. 2018. DOI: [10.1016/j.biortech.2017.09.193](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.193).
- SHAABAN, M.; ZWIETEN, L. van; BASHIR, S.; YOUNAS, A.; NÚÑEZ-DELGADO, A.; CHHAJRO, M. A.; KUBAR, K. A.; ALI, U.; RANA, M. S.; MEHMOOD, M. A.; HU, R. A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. **Journal of Environmental Management**, v. 228, p. 429-440, Dec. 2018. DOI: [10.1016/j.jenvman.2018.09.006](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.006).
- SIGNOR, D.; DEON, M. D. Influência do biocarvão na retenção de água em Argissolo e Vertissolo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 20.; SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 5., 2017, Juazeiro. **A agrometeorologia na solução de problemas multiescala**: anais. Petrolina: Embrapa Semiárido; Juazeiro: UnivasF; Campinas: SBA, 2017.
- SMEBYE, A.; ALLING, V.; VOGT, R. D.; GADMAR, T. C.; MULDER, J.; CORNELISSEN, G.; HALE, S. E. Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition. **Chemosphere**, v. 142, n. 1, p. 100-105, Jan. 2016. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2015.04.087](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.087).
- SONG, X. D.; XUE, X. Y.; CHEN, D. Z.; HE, P. J.; DAI, X. H. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation. **Chemosphere**, v. 109, n. 1, p. 213-220, Aug. 2014. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2014.01.070](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.01.070).
- STEINER, C. Las perspectivas de biocarbón: secuestro de carbono, ciclo de nutrientes y generación de energía. **Palmas**, v. 31, n. 2, p. 116-125, 2010. Número especial.
- STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; MACEDO, J. L. V. de; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, v. 291, n. 1/2, p. 275-290, 2007. DOI: [10.1007/s11104-007-9193-9](https://doi.org/10.1007/s11104-007-9193-9).
- SUKATORNO, W. H.; UTOMO, W. H.; KUSUMA, Z.; NUGROHO, W. H. Soil fertility status, nutrient uptake, and maize (*Zea mays* L.) yield following biochar and cattle manure application on sandy soils of Lombok, Indonésia. **Journal of Tropical Agriculture**, v. 49, p. 47-52, 2011.
- TANG, J.; ZHU, W.; KOOKANA, R.; KATAYAMA, A. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 116, n. 6, p. 653-659, 2013. DOI: [10.1016/j.jbiosc.2013.05.035](https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2013.05.035).
- VERHEIJEN, F.; JEFFERY, S.; BASTOS, A. C.; VELDE, M. van der; DIAFAS, I. **Biochar application to soils**: a critical scientific review of effects on soil properties, process and functions. Luxemburgo: Institute for Environment and Sustainability, 2009. 149 p.
- WANG, D.; LI, C.; PARIKH, S. J.; SCOW, K. M. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils: A multi-scale analysis. **Geoderma**, v. 340, p. 185-191, Apr. 2019. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.01.012](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.012).
- WANG, G.; XU, Z.; LI, Y. Effects of biochar and compost on mung bean growth and soil properties in a Semi-arid area of Northeast China. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 18, n. 5, p. 1056-1060, 2016. DOI: [10.17957/IJAB/15.0210](https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0210).
- XIAO, Q.; ZHU, L.; SHEN, Y.; LI, S. Sensitivity of soil water retention and availability to biochar addition in rainfed semi-arid farmland during a three-year field experiment. **Field Crops Research**, v. 196, n. 1, p. 284-293, Sept. 2016b. DOI: [10.1016/j.fcr.2016.07.014](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.014).
- XIAO, Q.; ZHU, L.; ZHANG, H.; LI, X.; SHEN, Y.; LI, S. Soil amendment with biochar increases maize yields in a semi-arid region by improving soil quality and root growth. **Crop and Pasture Science**, v. 67, n. 5, p. 495-507, May 2016a. DOI: [10.1071/CP15351](https://doi.org/10.1071/CP15351).
- YAMATO, M.; OKIMORI, Y.; WIBOWO, I. F.; ANSHORI, S.; OGAWA, M. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 52, n. 4, p. 489-495, Apr. 2006. DOI: [10.1111/j.1747-0765.2006.00065.x](https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2006.00065.x).
- ZHANG, J.; LU, F.; SHAO, L.; HE, P. The use of biochar-amended composting to improve the humification and degradation of sewage sludge. **Bioresource Technology**, v. 168, n. 1, p. 252-258, Sept. 2014. DOI: [10.1016/j.biortech.2014.02.080](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.080).
- ZHOU, H.; ZHANG, D.; WANG, P.; LIU, X.; CHENG, K.; LI, L.; ZHENG, J.; ZHANG, X.; ZHENG, J.; CROWLEY, D.; VAN ZWIETEN, L.; PAN, G. Changes in microbial biomass and the metabolic quotient with biochar addition to agricultural soils: A Meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 239, n. 1, p. 80-89, Feb. 2017. DOI: [10.1016/j.agee.2017.01.006](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.006).
- ZWIETEN, L. van; KIMBER, S.; MORRIS, S.; CHAN, K.; DOWNIE, A.; RUST, J.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, v. 327, n. 1, p. 235-246, 2010. DOI: [10.1007/s11104-009-0050-x](https://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x).

Energias renováveis

Estratégia para o desenvolvimento sustentável

Claudemiro de Lima Júnior
Gustavo de Novaes Pires Leite
Franciele Weschenfelder
Emmanuel Damilano Dutra
Regina Lúcia Félix de Aguiar Lima

Introdução

A formulação de estratégias para um futuro energeticamente sustentável tem sido objeto de intensos debates na comunidade científica nacional e internacional. Dentre as principais estratégias, destacam-se o aumento da eficiência energética, a mudança nos hábitos de consumo energético e a geração de energia com fontes renováveis (Goldemberg, 2010). O uso de energias renováveis é uma das principais estratégias para a mitigação global das emissões de gases de efeito estufa, por causa da grande participação do setor energético nas emissões globais. No Brasil, o setor energético corresponde a 33% das emissões em dióxido de carbono (CO₂) equivalente, sendo superior às emissões do setor agropecuário, que corresponde a 31% (Brasil, 2017). Grande parte das emissões do setor energético se deve, principalmente, à queima de combustíveis fósseis para a geração de energia térmica e elétrica.

O consumo de energia “per capita” em países desenvolvidos é maior que o consumo em países em desenvolvimento. Contudo, nos países em desenvolvimento, verifica-se uma relação entre o menor consumo de energia com aspectos negativos dos índices de desenvolvimento humano, como a baixa expectativa de vida, e as altas taxas de mortalidade infantil e de analfabetismo (Simas; Pacca, 2013).

A necessidade de reduzir o uso de derivados de petróleo e, conseqüentemente, a dependência energética em relação aos países exportadores de petróleo bem como a diminuição da emissão dos gases causadores do efeito estufa são apontadas como as principais motivações para que as energias renováveis tenham participações significativas nas matrizes energéticas dos países desenvolvidos e em desenvolvimento (Rodrigues; Costa, 2012). A inovação e o desenvolvimento de tecnologias de conversão e aproveitamento de recursos energéticos renováveis são fundamentais para o desenvolvimento sustentável.

As fontes de energia são caracterizadas como renováveis quando podem se regenerar de modo natural ou por ação antrópica, em que nesse grupo estão as fontes solar, hídrica, geotérmica, eólica, de onda, de maré e de biomassa. As não renováveis irão findar ou ter redução drástica em um intervalo de tempo determinado (décadas ou séculos) e não podem ser repostas após o uso, pois foram formadas num tempo medido em milhões de anos, em que nesse grupo estão os combustíveis fósseis e o material radioativo para fins energéticos. Na Figura 1, apresenta-se um fluxograma com as fontes de energia renováveis e não renováveis.

A energia proveniente da radiação eletromagnética emitida pelo Sol, na forma de luz e calor, é a principal fonte de energia renovável para os seres vivos da Terra (Figura 1). A energia solar

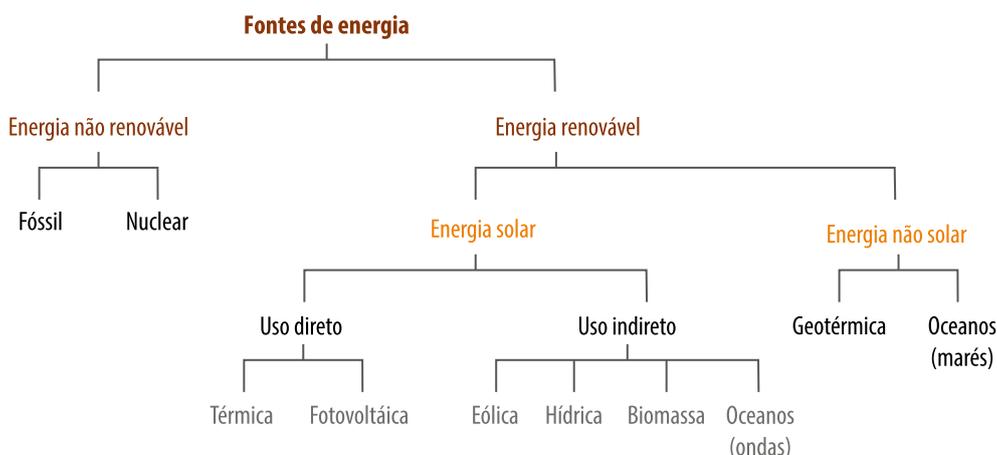


Figura 1. Fluxograma da classificação das fontes de energia renovável e não renovável.

pode ser utilizada diretamente na forma térmica ou pode ser convertida em energia elétrica. Além desse uso direto, a energia solar atua nas condições climáticas, no ciclo da água e na produção vegetal, que são fontes de energia na forma eólica, hídrica, de biomassa e de ondas (Moreira, 2017). As fontes de energia geotérmica e de marés, também renováveis, têm potenciais variados para o Brasil, mas não para o Semiárido brasileiro. Essa região possui grande potencial para a produção de energia de fontes renováveis hídrica, eólica, solar e de biomassa. O potencial para energia hídrica já está provavelmente implantado, contudo o potencial de geração de energia solar, eólica e de biomassa pode ainda ser amplamente explorado.

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2017 (Balanço..., 2017), a oferta de energia interna do Brasil no ano de 2016 foi de 43,5% de energias renováveis e 56,5% de não renováveis. Entre as fontes renováveis, as maiores participações foram da biomassa da cana-de-açúcar (17,5%), da energia hidrelétrica (12,6%) e a lenha de carvão vegetal (8,0%). Entre as fontes não renováveis, a maior participação é a de petróleo e derivados (36,5%), gerando grandes quantidades de CO₂ na atmosfera, apontado como principal agente do aquecimento global (Angelotti et al., 2015).

A participação das energias renováveis na matriz de energia elétrica do Brasil vem aumentando nos últimos anos, por causa da queda da geração térmica à base de combustíveis fósseis e

do incremento das gerações eólica e hidráulica. No ano de 2016, a geração de energia elétrica foi predominantemente de fontes renováveis de energia, com maior participação da energia hidráulica (68,1%), seguida da biomassa (8,2%) (Balanço..., 2017).

No entanto, grandes desafios para aumento da geração de energias renováveis estão relacionados à exploração de potenciais áreas do Brasil. Uma das áreas com grande potencial para geração de energia com fontes renováveis é o Semiárido brasileiro. Em parte, este potencial já vem sendo explorado com o uso da biomassa de lenha extraída da Caatinga, da energia eólica e da energia solar, sendo que esta última ainda é utilizada de forma incipiente. Com isso, o objetivo deste capítulo é apresentar como essas fontes de energias renováveis podem contribuir para a sustentabilidade energética em regiões semiáridas, especificamente a região semiárida do Brasil, bem como discutir as principais tecnologias e desafios para produção de energia.

Energia solar

O Sol é a principal fonte de energia do planeta, responsável por praticamente todas as formas de energia necessárias à sobrevivência do homem, como luz, calor e alimentos, além de promover o ciclo da água. Considerada uma fonte inesgotável de energia, o Sol é uma estrela de tamanho médio e a energia liberada por ele re-

sulta das reações de fusão nuclear dos átomos de hidrogênio para formar hélio. A taxa de energia emitida pelo Sol é constante há bilhões de anos e da ordem de $3,86 \times 10^{26}$ W. Sua reserva energética é estimada em 5 bilhões de anos (Moreira, 2017).

De toda a radiação solar incidente no planeta Terra, apenas 51% é absorvido pela superfície terrestre; a outra parte é absorvida ou refletida pela atmosfera e pelas nuvens. O estudo da geometria Terra-Sol verificou que o planeta Terra recebe a radiação de forma mais concentrada nas regiões próximas à linha do Equador e com menor incidência nos polos, fazendo que haja um gradiente de temperatura no planeta, resultando em áreas mais áridas na zona equatorial. Além disso, ao longo do ano, graças ao movimento de translação da Terra, também há uma grande variação de incidência solar, que são menos perceptíveis nas áreas equatoriais do que nas demais áreas do planeta (Pinho; Galdino, 2014).

A análise do mapa de distribuição da irradiação solar no Brasil (Figura 2) permite verificar que todo o território brasileiro recebe elevada irradiação. Entretanto, a região Nordeste apresenta os mais altos níveis de irradiação solar, em torno de $5,5 \text{ kWh m}^{-2}$ com a vantagem de possuir pequena variabilidade mensal (Pereira et al., 2017).

O Semiárido brasileiro tem capacidade de aumentar significativamente a participação da energia solar na expansão da matriz energética renovável brasileira, aumentando a diversificação das fontes energéticas e a exploração das possíveis complementaridades entre outras fontes também renováveis, como a implantação de sistemas híbridos eólica/solar e/ou hidráulica/solar. Dentre as principais formas de aproveitamento da energia solar estão o aproveitamento solar térmico, que consiste em converter a energia emitida pelo sol em energia térmica, e a geração de energia elétrica fotovoltaica.

Energia solar térmica

As tecnologias de aproveitamento solar térmico podem ser utilizadas para obtenção de

temperaturas de até $100 \text{ }^\circ\text{C}$, com aplicação no aquecimento de água e secagem de alimentos, ou para processos industriais que demandam temperaturas bem mais altas que $100 \text{ }^\circ\text{C}$, como geração de vapor para a geração de energia elétrica, em centrais heliotérmicas, ou seja, termoelétricas a partir da energia solar.

A tecnologia mais difundida e popularizada, sem dúvida, é o aquecedor solar de água (componentes principais apresentados na Figura 3), que consiste, basicamente, em coletores solares planos por onde circula a água e em um reservatório térmico (Figura 3). A troca de temperatura entre a água aquecida e a mais fria é realizada pelo efeito natural termo sifão, em que a água aquecida tende a subir em direção ao reservatório térmico e a água mais fria desce para os coletores. Desse modo, o reservatório acumulará o máximo de calor possível. Essa tecnologia é comercial e apresenta boa viabilidade econômica, sendo utilizada em residências, hotéis e hospitais, e, mais recentemente, instalada em casas populares, com financiamento público, visando à redução do consumo de energia elétrica.

O uso das tecnologias de aproveitamento solar térmico poderia ser maior no Semiárido, agregando mais tecnologia nos processos de secagem, aquecimento de ambientes para criação e esterilização de produtos, como o secador solar, que pode ser utilizado para desidratação de carnes, frutas, verduras, peixes, sementes, etc., utilizando apenas a energia solar. O modelo mais simples pode ser construído a partir de materiais de baixo custo, de acordo com a necessidade real do produtor rural. Não sendo um projeto padronizado, evita possíveis desperdícios. Além de diminuir o tempo de secagem e reduzir o tempo de trabalho da família, o secador garante uma qualidade maior do produto, visto que o equipamento fica protegido de chuvas, sujeira e de possíveis parasitas.

Os fogões solares, por meio da radiação solar, geram calor para cozinhar alimentos, aquecer água e outras finalidades. De fácil confecção e baixo custo, os fogões solares apresentam-se

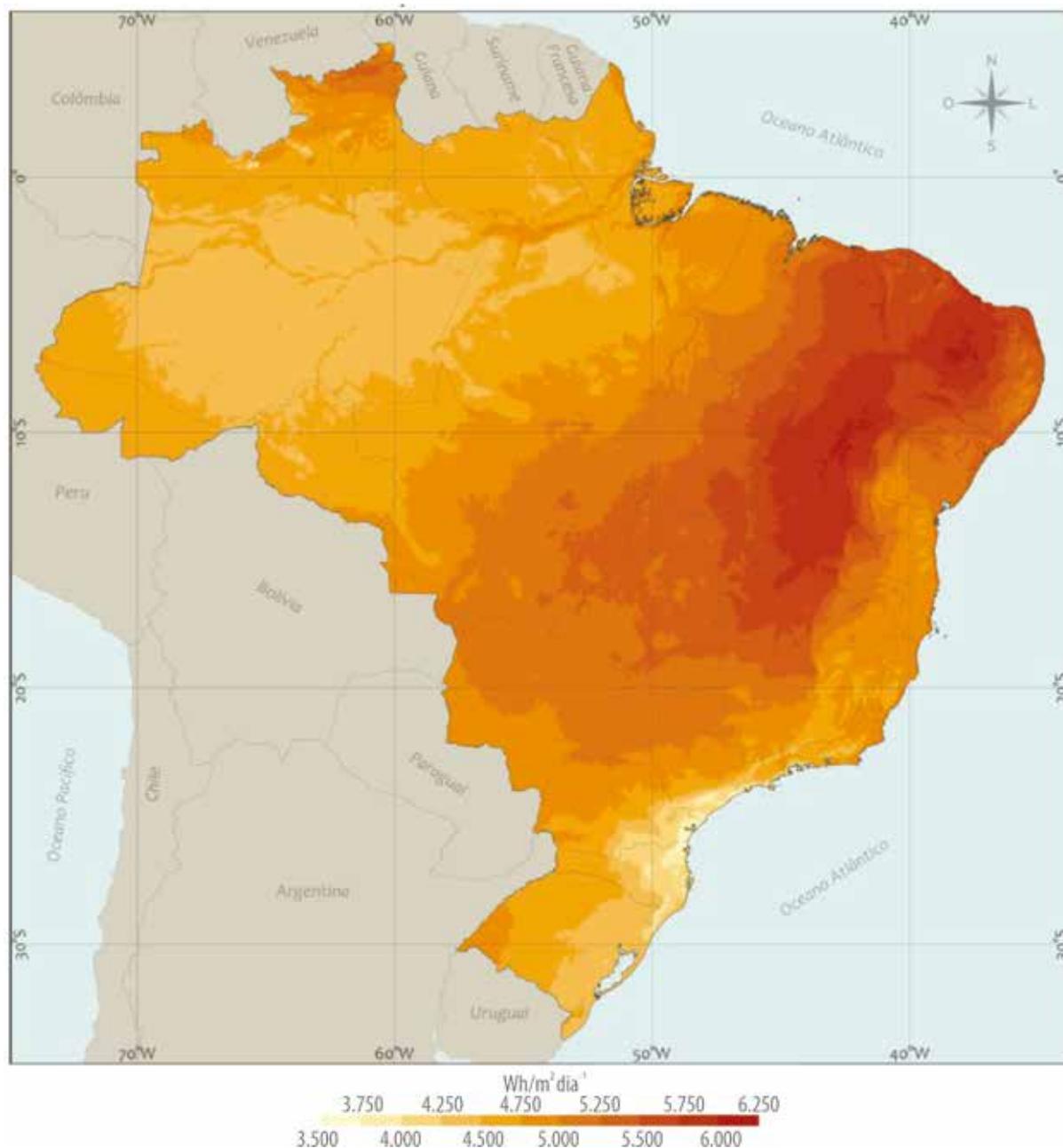


Figura 2. Total diário da irradiação no Brasil, média anual.

Fonte: Adaptado de Pereira et al. (2017).

como uma alternativa bastante viável para a região.

Todas essas tecnologias de aproveitamento solar térmico já estão bem estabelecidas e são usadas há muitos anos (Campos et al., 2018). É importante ressaltar que, atualmente, a fonte de calor para parte desses processos é derivada da queima de combustíveis não renováveis

(lenha) e sua substituição diminuiria substancialmente as emissões de carbono.

A geração heliotérmica de energia elétrica é uma possibilidade futura de geração elétrica na região Nordeste, com alto custo e ainda não completamente dominada pelos pesquisadores e pelos profissionais brasileiros. A sua implantação trará benefícios para indústria nacio-

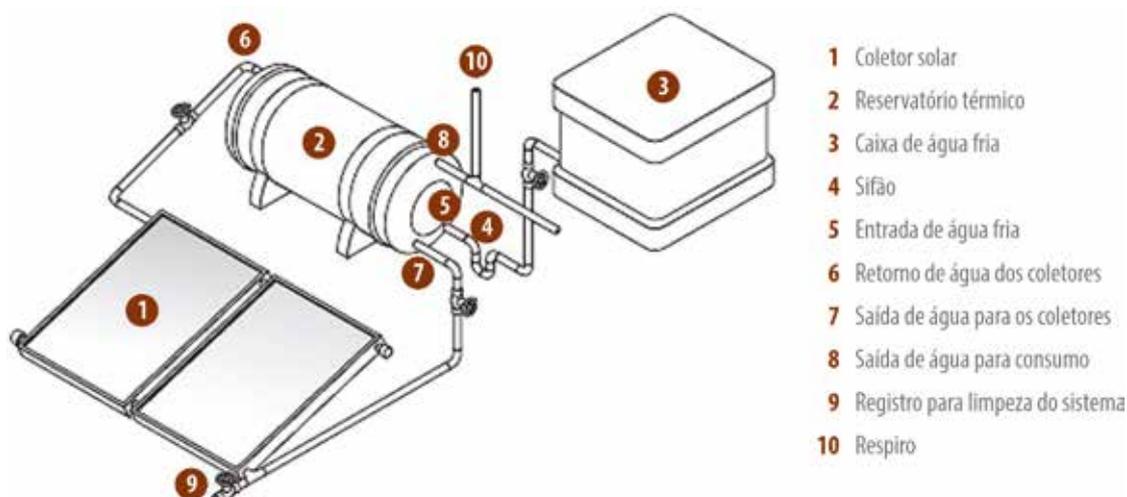


Figura 3. Componentes básicos de um sistema de aquecimento solar de água.

Fonte: Caldegas (2021).

nal e para o mercado de trabalho, com geração de empregos.

Entretanto, os índices de irradiação direta na superfície do Semiárido brasileiro fazem com que essa seja a única região do País que possa gerar energia elétrica a partir de sistemas que concentram a radiação solar (Martins et al., 2012). As duas principais tecnologias que permitem esse processo são os sistemas solares de concentração linear e os de concentração bidimensional. Os concentradores lineares direcionam o fluxo de radiação para o dispositivo absorvedor de energia solar. Sistemas bidimensionais concentram os raios solares sobre uma região aumentando a densidade de fluxo, permitindo temperaturas de trabalho mais altas, melhorando, dessa forma, a eficiência de conversão do ciclo termodinâmico para geração de potência.

Sistemas fotovoltaicos

A geração de energia elétrica solar ocorre pelo efeito fotovoltaico, que é a conversão direta da luz solar em eletricidade, sendo a célula fotovoltaica um dispositivo fabricado com material semicondutor, a unidade fundamental desse processo de conversão. Na Figura 4, apresentam-se os principais componentes de um módulo fotovoltaico.

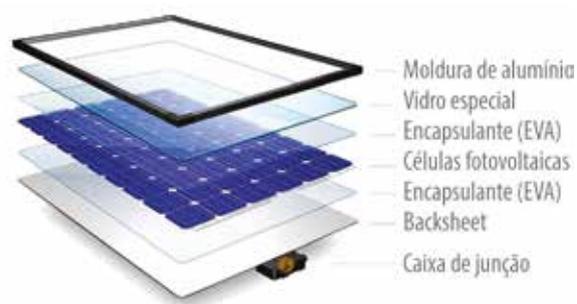


Figura 4. Principais materiais usados em um módulo fotovoltaico.

Fonte: Portal Solar (2021).

Os principais componentes de um módulo fotovoltaico são descritos a seguir:

- **Moldura de alumínio:** garante a robustez do módulo e a sua integridade nas mais adversas situações.
- **Vidro especial:** é um tipo de vidro com baixo teor de ferro, desenvolvido para refletir menos e deixar o máximo de luz passar através dele.
- **Encapsulante:** protege as células fotovoltaicas contra o envelhecimento causado por raios UV, temperaturas extremas e umidade, assegurando que o máximo de luz visível atinja as células solares.
- **Células fotovoltaicas:** componente principal do módulo fotovoltaico, em que ocorre uma

reação físico-química que transforma a luz do sol em energia elétrica.

- *Backsheet*: protege os componentes internos do painel solar, especificamente as células fotovoltaicas, agindo como um isolante elétrico.
- Caixa de junção: fica na parte de trás do módulo em que as células fotovoltaicas estão conectadas eletricamente.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em sistemas isolados e em sistemas interligados à rede – por geração distribuída (GD) ou por geração centralizada (GC). Em ambos os casos, podem operar apenas com a tecnologia fotovoltaica ou combinados com outras fontes de energia, quando são chamados de híbridos.

Sistemas fotovoltaicos isolados

Os sistemas fotovoltaicos isolados necessitam de algum tipo de armazenamento, como as baterias, que também funcionam como uma referência de tensão de corrente. Além das baterias, o sistema fotovoltaico isolado também utiliza controlador de carga e inversor, responsáveis pelo controle e condicionamento de potência. Os sistemas fotovoltaicos isolados individuais são utilizados para eletrificar domicílios individuais com energia solar, permitindo que moradores de áreas sem eletrificação possam ser beneficiados com energia elétrica para residências, escolas e outras atividades necessárias.

Algumas aplicações de sistemas fotovoltaicos isolados na agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas merecem destaque:

- Bombeamento de água para reservatórios elevados: a energia é armazenada em tanques elevados, na forma de energia potencial gravitacional, dispensando o uso de baterias.
- Bombeamento de água para uso direto na irrigação: os sistemas isolados podem ser utilizados sem armazenamento; quando toda a água bombeada, é imediatamente utilizada.

- Dessalinização de água para regiões com águas impróprias para o consumo humano por causa da alta concentração de sais, tão comuns no Semiárido. Pode ser realizada com o uso de dessalinizadores por osmose reversa acionados por energia fotovoltaica, suprimindo a queima de combustíveis fósseis para o acionamento da motobomba do dessalinizador.

A utilização dos sistemas fotovoltaicos isolados pode ser feita por minirredes, que podem proporcionar a eletrificação rural de comunidades isoladas, em substituição do uso de geradores a diesel, mitigando a emissão de gases poluentes e a produção de ruídos. Segundo IBGE (2018), 1% da população na região Nordeste não possui acesso à energia elétrica, o que representa um grande potencial para implantação desses sistemas.

Sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Nos sistemas conectados à rede, a produção de energia elétrica é entregue diretamente à rede elétrica, dispensando o uso de acumuladores. O gerador fotovoltaico representa uma fonte complementar ao sistema elétrico. Para tanto, é necessário que se utilize um inversor conforme as normas de segurança e qualidade, para que não degrade o sistema elétrico ao qual está conectado.

Quanto à capacidade de geração, os sistemas podem ser classificados como: microgeração distribuída, com potência instalada menor ou igual a 100 kW; minigerção distribuída, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW; e usinas fotovoltaicas, com potência instala superior a 1 MW.

Geração distribuída

A geração distribuída (GD) é caracterizada pela instalação de geradores de pequeno porte, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica. Existem diversos benefícios de-

correntes da redução da distância entre a geração de energia elétrica e o seu consumo, como a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão; bem como o baixo impacto ambiental e a diversificação da matriz energética.

Os sistemas de GD são bastante populares em países europeus e nos Estados Unidos. No Brasil, o seu uso vem crescendo exponencialmente, após o ano de 2012 (Figura 5), quando a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) criou o sistema de compensação de energia elétrica por meio da Resolução Normativa nº 482/2012 (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012), em que o consumidor (pessoa física ou jurídica) foi autorizado a gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e, inclusive, fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade, acumulando créditos a serem compensados em quilowatt-hora (kWh).

No ano de 2016, houve uma revisão das normas estabelecidas em 2012 com a publicação da Resolução Normativa nº 687/2015 (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015), que permitiu, entre outros itens, a ampliação do limite de potência instalada de 1.000 kWp para até 5.000 kWp por unidade consumidora, bem

como a validade de 60 meses para os créditos de energia gerados.

Apesar de todo o potencial energético do Semi-árido, os sistemas fotovoltaicos de mini e microgeração ainda são muito poucos, comparados ao seu potencial, e se concentram, principalmente, nos estados de Minas Gerais e São Paulo (Figura 6).

Geração fotovoltaica centralizada

A partir do ano de 2014, com a inclusão da energia solar fotovoltaica nos leilões de energia promovidos pelo governo federal, as usinas fotovoltaicas de grande porte começaram a ser instaladas no Brasil. Na Figura 7, apresenta-se a evolução da contratação de energia solar ao longo dos anos no Brasil.

No último leilão de energia realizado em abril de 2018, foram habilitados tecnicamente pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) um total de 442 projetos, totalizando uma potência de 13.380 MW de projetos fotovoltaicos para serem implantados no Brasil. Avaliando a distribuição dos projetos entre os estados, verifica-se

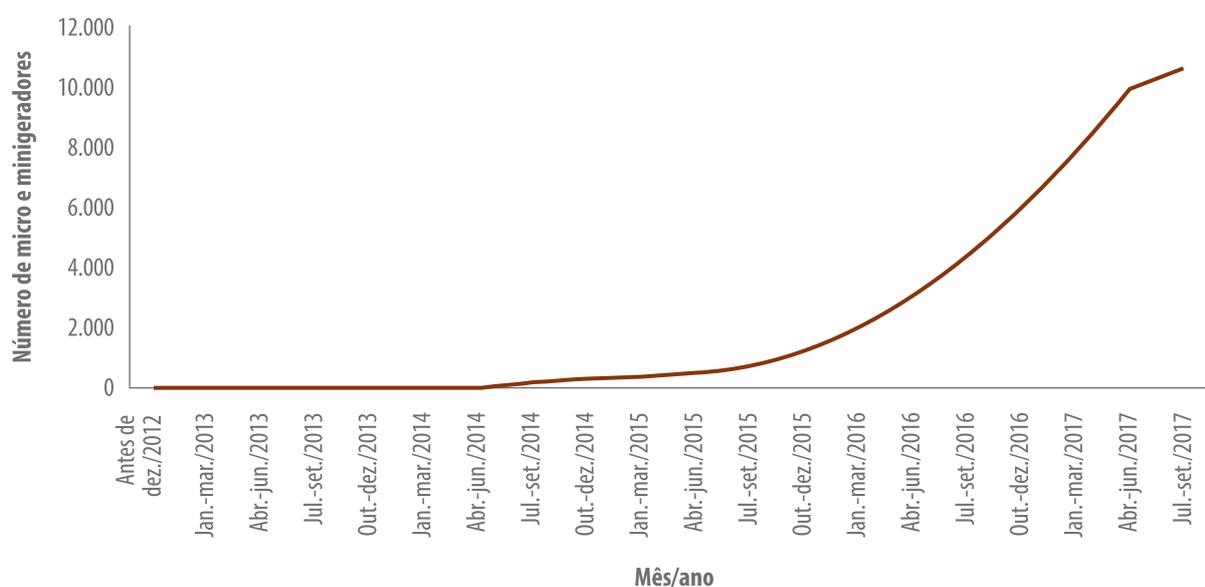


Figura 5. Evolução do número de unidades consumidoras com geração distribuída.

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2018).

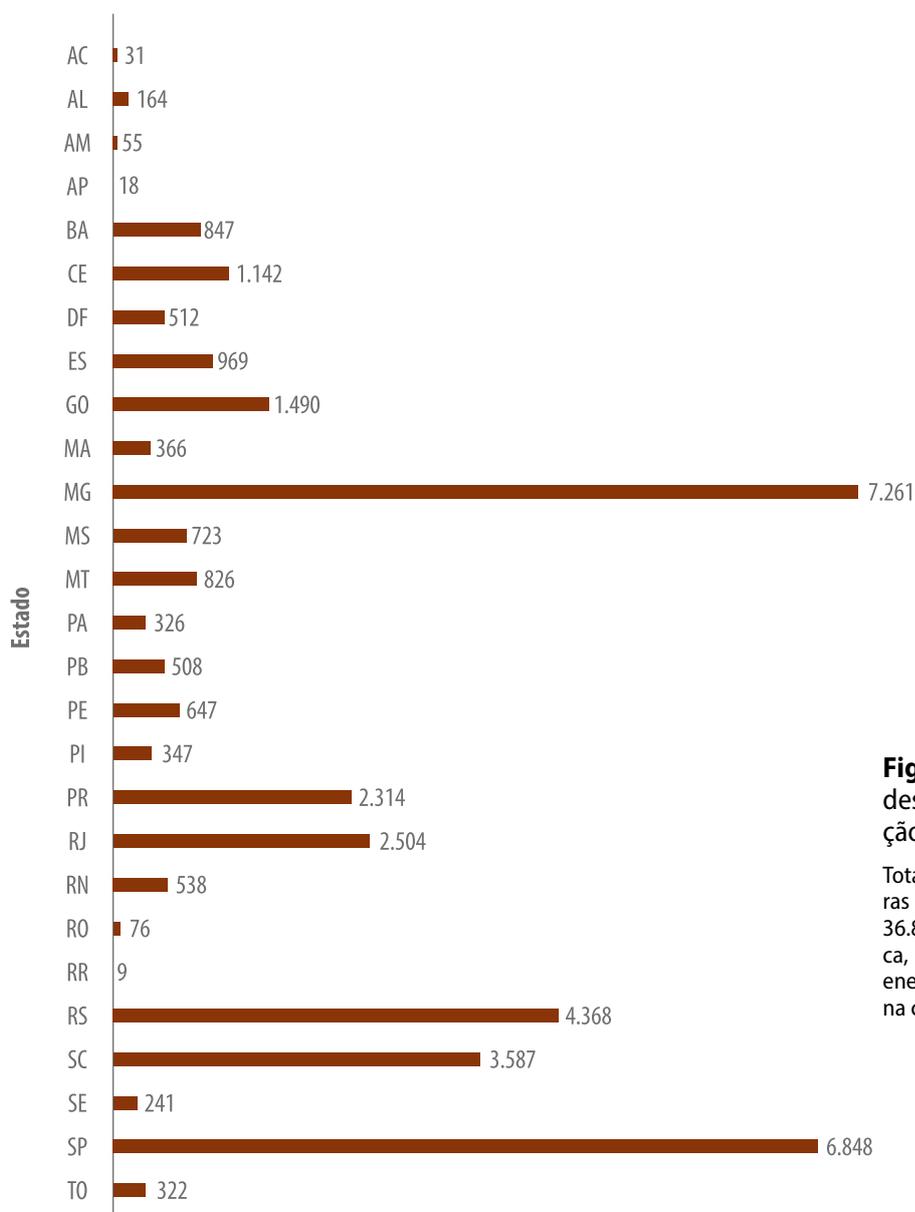


Figura 6. Número de unidades consumidoras com geração distribuída.

Total de 37.063 unidades consumidoras com geração distribuída. Sendo 36.843 com energia solar fotovoltaica, 57 com energia eólica, 107 com energia termelétrica e 56 com pequena central hidrelétrica.

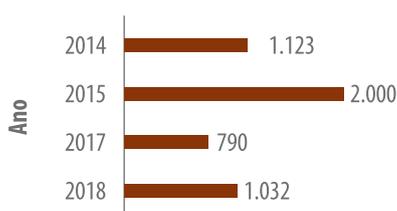


Figura 7. Potência contratada de energia solar por ano nos leilões de energia.

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2018).

que a grande concentração de projetos está no Nordeste do País, com mais de 80% (Figura 8).

As centrais fotovoltaicas existentes e o sistema elétrico planejado (centrais já contratadas, que estão em fase de obras) estão concentrados na região semiárida do Brasil, pois essa região possui altos índices de irradiação solar (Figura 9).

Potencial de utilização da energia solar no Semiárido

O Semiárido brasileiro é uma das regiões com maior índice de incidência solar do País, e este

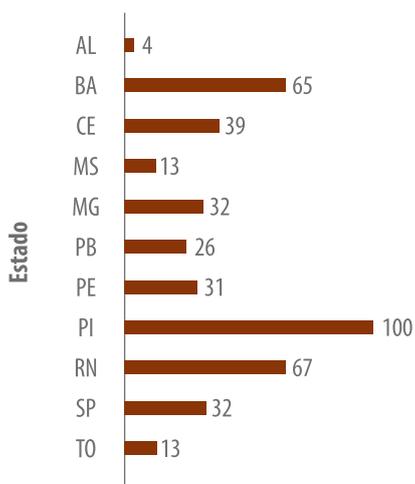


Figura 8. Número de projetos fotovoltaicos habilitados tecnicamente no leilão de abril/2018.

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2018).

fator pode ser usado em benefício dos sistemas agropecuários. Existem muitas técnicas de aproveitamento da energia solar térmica que são simples e podem auxiliar a vida do produtor rural, como o secador de grãos produzido com materiais de reúso. Entretanto, é necessário compreender as necessidades de cada produtor e/ou de cada microrregião para desenvolver ferramentas de aproveitamento térmico que auxiliem nos processos diários, aumentando a qualidade do produto final e diminuindo a mão de obra sem aumentar os custos de produção.

Ao considerar a energia solar fotovoltaica, existe muito a ser explorado na região. Os sistemas de irrigação podem ser instalados de maneira isolada do sistema elétrico, levando água para



Figura 9. Localização das centrais fotovoltaicas no Brasil (sistema elétrico existente e planejado).

locais remotos e transformando regiões improdutivas em verdadeiros celeiros de produção de alimentos.

Existem linhas de financiamento de sistemas fotovoltaicos, especialmente voltadas para o produtor rural, que podem potencializar ainda mais os resultados obtidos com os sistemas de energia solar na região com maior fator de capacidade de geração do País.

Energia eólica

A energia eólica, ou energia contida nos ventos, é uma fonte de energia que tem sua origem a partir do sol, uma vez que os ventos são causa-

dos basicamente por gradientes de pressão atmosférica, criados em função do aquecimento desigual da atmosfera, resultante da combinação de topografia, tipo de solo, quantidade de nuvens e outros fatores.

A região Nordeste do Brasil apresenta um grande potencial eólico (Figura 10) (Pinto Júnior et al., 2017). Considerando uma altura de 50 m, além da faixa litoral do País, a região com maior potencial de aproveitamento eólico é o Semiárido nordestino.

Nessa região, a intensidade do vento decresce à medida que se afasta do litoral, por causa dos efeitos de rugosidade, das barreiras naturais pela orografia regional e da diminuição do efeito das brisas marítimas. Entretanto, alguns

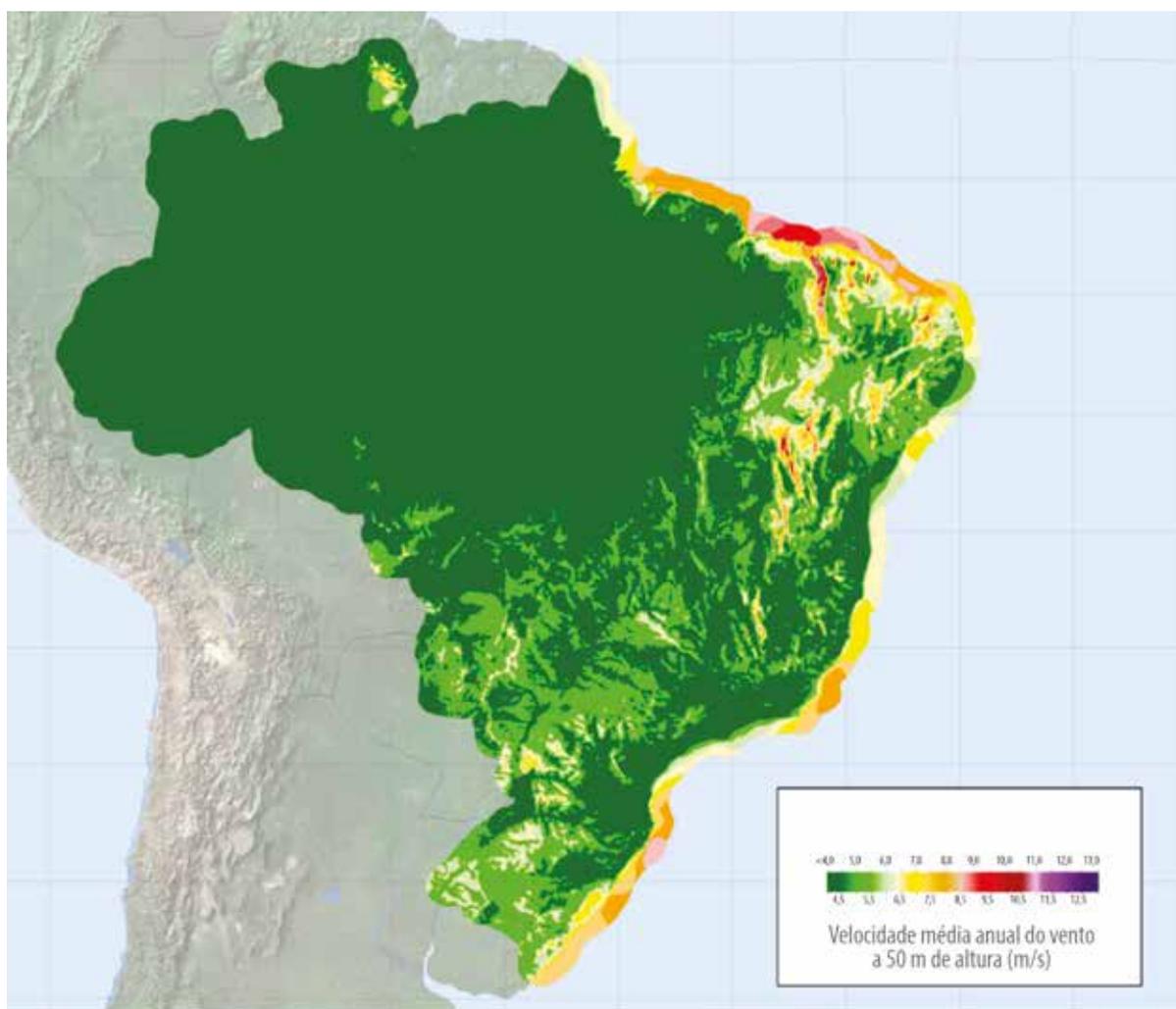


Figura 10. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, com velocidade média anual do vento a 50 m de altura.

Fonte: Adaptado de Pinto Júnior (2017).

fatores apresentam condições que aceleram o vento como as brisas de lagos em áreas isoladas, como as que circundam o Lago de Sobradinho e o Lago de Itaparica na Bahia, e as diversas áreas elevadas de montanhas, serras e chapadas que se estendem do Rio Grande do Norte à Bahia.

Os agricultores das áreas rurais do Semiárido já aproveitam a energia dos ventos há várias décadas para o bombeamento de água. Em 2003, o Ministério de Minas e Energia cadastrou todos os poços, fontes naturais, barragens subterrâneas e reservatórios superficiais significativos em uma área de 225.000 km² da região semiárida (Brasil, 2003). Segundo o relatório, naquele ano, 3.972 poços utilizavam bombeamento eólico com os cataventos multipás. As maiores concentrações de uso dos cataventos foram localizadas nos estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Pernambuco.

O excelente potencial da região Nordeste e em particular da região do Semiárido fica evidente quando se observam as centrais eólicas ins-

taladas no Brasil até os dias atuais (Figura 11). A grande maioria das centrais eólicas, cerca de 84%, estão instaladas no Nordeste brasileiro (Figura 11).

A partir de 2004, observa-se um crescimento da capacidade instalada graças ao primeiro programa para instalações de fontes de energias renováveis no Brasil, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) (Agência Nacional de Energia Elétrica (2018)). Em seguida, a partir de 2009 surgem os primeiros leilões de energia eólica do País. O modelo de leilão se consolidou como meio para a contratação contínua de projetos de energia eólica no País, o que promoveu um aumento contínuo e substancial desde então.

Cabe ressaltar nesse ponto que os primeiros projetos eólicos instalados se situavam no litoral do Nordeste em razão do excelente potencial e infraestrutura facilitada. Contudo, os projetos eólicos a partir dos leilões se direcionaram para o interior onde o potencial é muito interessante e há grande disponibilidade de área.

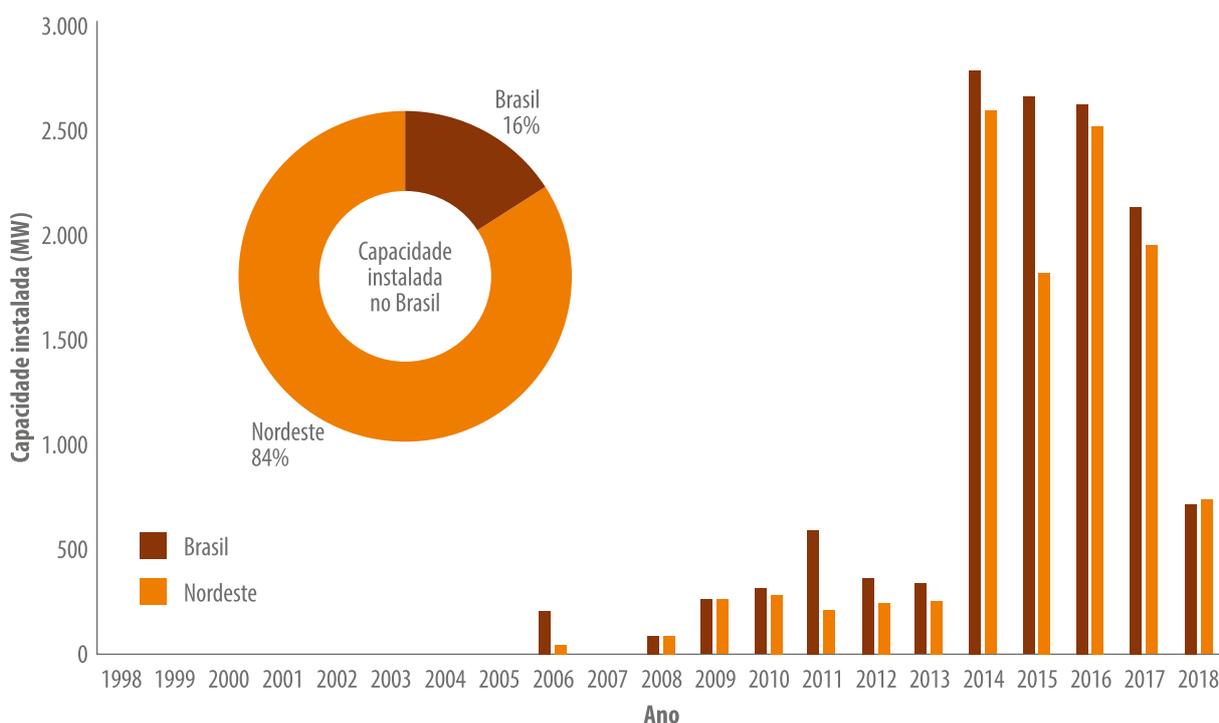


Figura 11. Capacidade anual de energia eólica instalada no Brasil e no Nordeste.

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica (2018).

Turbinas eólicas

A turbina eólica, ou aerogerador, é uma máquina que capta a energia cinética dos ventos e a converte em energia mecânica, por meio de um rotor aerodinâmico com duas ou mais pás, e, finalmente, a converte, por meio de um gerador elétrico, em energia elétrica. Variam desde pequenas turbinas, com capacidade de produzir potências de centenas de quilowatts, até turbinas de grande porte que produzem potências na ordem de 10 MW. Essas máquinas podem operar tanto em sistemas isolados quanto em sistemas interconectados com a rede elétrica. Na Figura 12, apresentam-se ilustrações de turbinas de pequeno e grande porte assim como suas aplicações típicas.

As turbinas de pequeno porte (TPPs) têm aplicabilidade similar às dos sistemas fotovoltaicos isolados, que são utilizados para alimentação de cargas em locais remotos onde a extensão da rede elétrica convencional ainda é uma alternativa dispendiosa. Como a geração de energia está associada ao fluxo de vento, sendo a geração elétrica intermitente, as TPPs devem ser associadas a um banco de baterias ou a outra fonte geradora, como geradores acionados a diesel ou biogás. Outras aplicações na agricultura incluem o bombeamento de água para a irrigação, a dessalinização por osmose reversa, ou a sua utilização em minirredes.

As TPPs também podem ser utilizadas na GD conforme estabelecido nas resoluções normativas ANEEL nº 482/2012 e nº 687/2015 (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012, 2015). Em relação às placas fotovoltaicas, as TPPs têm a vantagem de gerar energia também à noite,

prolongando o período de geração de potência elétrica. Como desvantagem, pode ser citado o ruído produzido pela turbina e a altura de instalação, pois a máquina deve ser posicionada sobre uma torre, de preferência em uma área sem obstáculos para o vento, o que acaba limitando um pouco o seu uso em áreas urbanas.

Verifica-se o crescimento vertiginoso da instalação de novos sistemas a partir dos mecanismos regulatórios estabelecidos pelas regras da Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015) (Figura 13), quando se avalia a capacidade anual instalada de turbinas eólicas no âmbito da GD.

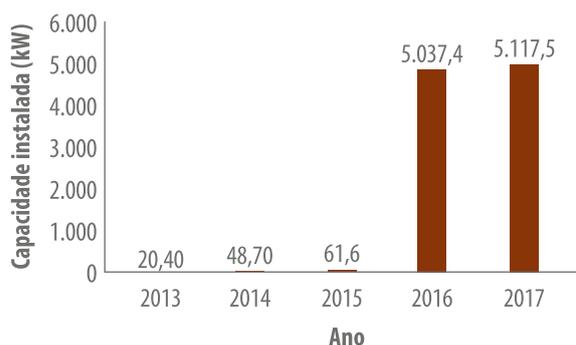


Figura 13. Capacidade instalada proveniente de turbinas eólicas no âmbito da geração distribuída.

Existe também a possibilidade de implantação de sistema híbrido de GD, de turbina eólica e placas fotovoltaicas, tal como mostrado no exemplo da Figura 14, instalado num estabelecimento comercial na área urbana de Petrolina, PE, município do Submédio do Vale do São Francisco.

Fotos: Gustavo Novaes



Pequeno porte

Potência entre 1 kW e 200 kW
Residências, fazendas, aplicações remotas
Sistemas híbridos
Geração distribuída



Grande porte

Potência entre 500 kW até 8 MW+
Centrais eólicas
Sistemas conectados
Geração distribuída

Figura 12. Turbinas eólicas de pequeno e grande porte e suas características.



Foto: Claudemiro Júnior

Figura 14. Sistema híbrido de geração de energia instalado em estabelecimento comercial em Petrolina, PE, no Submédio do Vale do São Francisco.

Geração eólica centralizada

As centrais eólicas – também denominadas de parques, usinas ou fazendas eólicas – geram energia elétrica a partir de várias turbinas eólicas, interligadas eletricamente, injetando energia no mesmo ponto da rede elétrica. A sua instalação é feita baseada em estudos que levam em conta aspectos técnicos e econômicos, como maximização de energia produzida, redução dos custos de obras civis, redução dos custos de obras elétricas, impactos ambientais e visuais, ruídos, otimização das rotinas de operação e manutenção visando à redução dos respectivos custos, entre outros.

No início da implantação de centrais eólicas no Brasil em meados de 2004, as turbinas possuíam uma capacidade instalada unitária de cerca de 800 kW, com rotores com cerca de 50 m de diâmetro e altura da torre de 70 m. Atualmente, as centrais eólicas são constituídas de turbinas eólicas com capacidade de potência acima de 3 MW, com rotores com mais de 120 m de diâmetro e altura da torre de mais de 120 m.

Na última década, houve um grande aumento da participação da geração de energia elétrica no Brasil por centrais eólicas. Isso se deve principalmente aos leilões de energias renováveis promovidos pelo governo federal, os quais criaram uma demanda por projetos de energia eólica, e aos custos, que, graças à economia de escala e ao mercado criado, vêm diminuindo constantemente ao longo do tempo, tornando a tecnologia eólica a fonte mais barata nos últimos leilões de energia.

Na região Nordeste, dada a grande capacidade instalada atualmente e ao excelente potencial eólico, há momentos (dias) em que 100% da energia demandada é suprida a partir das centrais eólicas instaladas na região.

Cabe aqui ressaltar a possibilidade de complementariedade com a fonte hídrica que existe na região Nordeste, conforme apresentado na Figura 15. Os períodos de elevada geração eólica no Nordeste coincidem com os períodos de baixa vazão no Rio São Francisco. Dessa forma, a geração de energia eólica na região contribui para o acúmulo de água nos reservatórios das

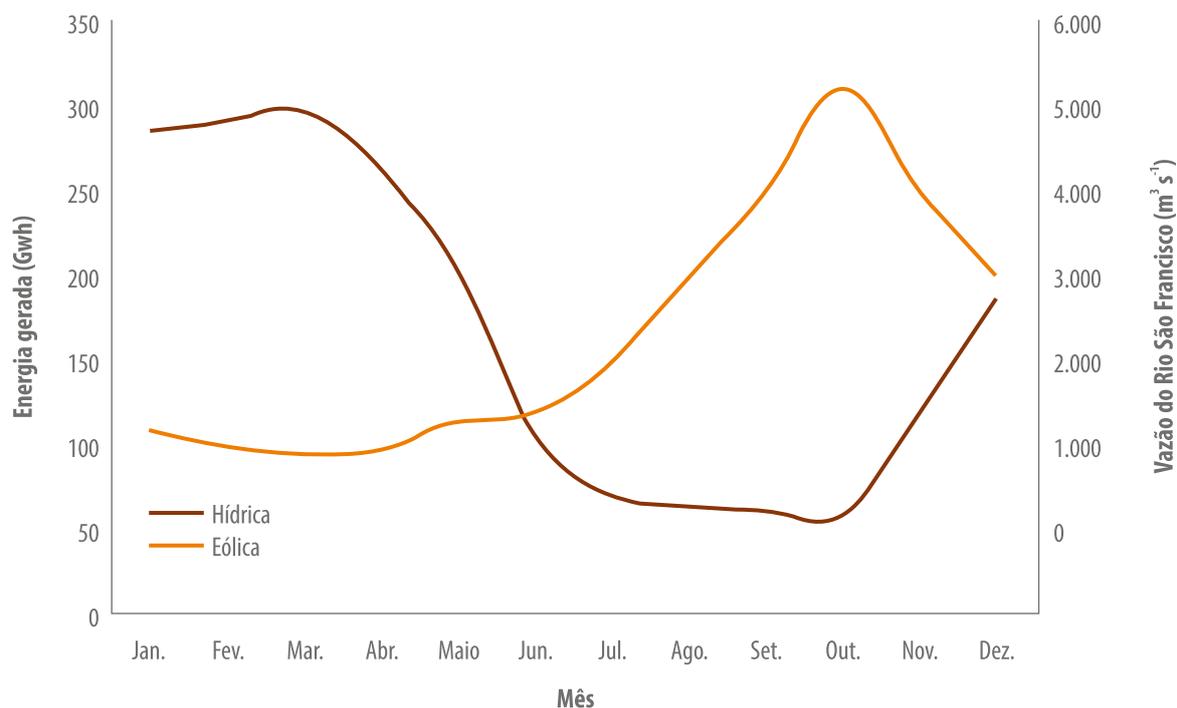


Figura 15. Complementariedade entre as fontes eólica e hídrica.

hidroelétricas, o que implica não apenas maior confiabilidade no sistema elétrico, mas também disponibilidade de água para as comunidades no entorno dos reservatórios.

De modo geral, as usinas de geração de energias renováveis localizam-se em áreas rurais de baixa densidade demográfica e demandam grande quantidade de mão de obra na fase de instalação, gerando potencial para capacitação e emprego para as populações rurais em diversas localidades (Nguyen, 2017). Durante a fase de operação e manutenção, mesmo em menor quantidade, há oportunidade de empregos e alternativas para população local, contribuindo para o desenvolvimento rural (Rio; Burguillo, 2008), o que é significativo para a região. A população rural tem maior percepção dos benefícios sociais gerados pela implementação das energias renováveis do que a população urbana, especialmente no tocante à geração de renda (Simas; Pacca, 2013).

Esses benefícios são vários, destacando-se: utilização de áreas que antes não interessavam à agricultura e pecuária (áreas de difícil acesso e de orografia complexa); fixação do homem do

campo em razão do arrendamento de terras pelas centrais eólicas; geração de empregos durante as fases de instalação, operação e manutenção; construção de estradas de acesso para a população vizinha, o que acaba viabilizando o transporte de produtos produzidos na região. Além disso, muitas vezes esses empreendimentos também produzem melhorias nas comunidades locais, como reformas de escola e infraestrutura pública, fornecimento de energia a custo reduzido, construção de bibliotecas, entre outros.

A instalação de centrais eólicas combinadas a políticas eficientes de gestão de recursos e de desenvolvimento regional pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de comunidades rurais no Semiárido brasileiro (Simas; Pacca, 2013).

Energia de biomassa

A definição de biomassa considera como tal a matéria vegetal gerada pela fotossíntese e seus diversos produtos e subprodutos, como as flo-

restas, as culturas e os resíduos agrícolas. Consideram-se como biomassa também dejetos animais e matéria orgânica contida nos rejeitos industrial e urbano (Cruz; Nogueira, 2004; Coelho et al., 2008). A biomassa contém a energia química acumulada por meio da transformação energética da radiação solar e pode ser diretamente liberada por meio da combustão, ou ser convertida mediante diferentes processos em produtos energéticos, como: carvão vegetal, etanol, gases combustíveis, óleos vegetais combustíveis, etc.

A biomassa foi a principal fonte de energia para a humanidade até meados do século 19. Atualmente, participa com 10% da oferta de energia, aproximadamente 90% com produtos derivados de madeira (World Bioenergy Association, 2016). No Brasil, a biomassa participa com 27% da oferta interna de energia e 8% na matriz de energia elétrica (Balanço..., 2017).

Estima-se que a produção anual de biomassa no mundo seja de 120×10^{15} g de biomassa vegetal seca, que estoca 2.2×10^{21} J de energia, três a quatro vezes a demanda de energia da população mundial, que em 2012 foi de 550 EJ. No entanto, cabe ressaltar que grande parte dessa biomassa se encontra indisponível para o aproveitamento energético, uma vez que estão em área de preservação ambiental. De qualquer forma, as perspectivas indicam que a biomassa possa satisfazer até 30% da demanda global de energia em 2050 (Guo et al., 2015).

No Nordeste do Brasil, a biomassa participa com até 30% da oferta de energia primária usada pelos setores que consomem energia térmica. As principais fontes de biomassa no Nordeste são a lenha na região semiárida e a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) na região litorânea. Além dessas fontes, os subprodutos gerados nas cadeias de produção também apresentam algum potencial de aproveitamento. Em 2013, com o objetivo de se estimar o potencial energético das principais fontes de biomassa da região Nordeste do Brasil, foi realizado um levantamento da produção, divulgada nas bases de dados 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e do poten-

cial de geração de energia, estimado mediante cálculos de conversão energética, baseados no poder calorífico e na disponibilidade de cada biomassa (Lima Júnior et al., 2014). As biomassas que apresentaram maior disponibilidade energética foram o bagaço de cana-de-açúcar, a lenha da Caatinga, os resíduos urbanos, o etanol e o coco-da-baía (*Cocos nucifera* L.).

A biomassa pode ser classificada do ponto de vista do aproveitamento energético em três grandes grupos: biomassa florestal, biomassa agrícola e resíduos urbanos (Nogueira; Lora, 2002):

- Biomassa energética florestal: é proveniente dos recursos florestais, seus produtos e subprodutos. Incluem basicamente a lenha, que pode ser obtida por meio de florestas cultivadas ou florestas nativas sob manejo florestal sustentável (MFS). Os subprodutos são os originados por atividades que processam a madeira para fins não energéticos, como a indústria moveleira e a indústria de papel e celulose (Silva et al., 2009; Brand, 2010).
- Biomassa energética agrícola: é derivada de colheitas e estão neste grupo: a) as culturas para fins energéticos, como a cana-de-açúcar, o milho (*Zea mays* L.), o trigo (*Triticum* spp.) e todas as oleaginosas destinadas à produção de biocombustíveis; b) os subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal, como cascas de arroz (*Oryza sativa* L.), a castanha-de-caju (*Anacardium occidentale* L.) e o esterco animal (Henriques, 2009; Menezes et al., 2011).
- Resíduos urbanos: corresponde à fração orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos (RSU). Trata-se de uma mistura heterogênea de metais, plásticos, vidro, resíduos celulósicos e vegetais, e de matéria orgânica, a qual pode ser aproveitada por diversas rotas tecnológicas (Salomon; Lora, 2005; Paro et al., 2008).

O aproveitamento da biomassa pode ser feito por meio de diferentes tipos de conversão energética, como a termoquímica, que inclui os processos de combustão direta, gaseificação e pirólise;

a bioquímica, que inclui os processos de digestão anaeróbica, fermentação/destilação e hidrólise; e a físico-química, que inclui compressão, extração e transesterificação (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2002; Cruz; Nogueira, 2004).

Atualmente, na região semiárida o processo mais utilizado de conversão de biomassa em energia é a combustão direta de lenha, extraída, na sua maioria, de forma insustentável. Os maiores estoques deste tipo de biomassa estão na Bahia, Piauí, Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte, por causa da área de Caatinga dos estados, e na proporção dos municípios nessa vegetação. A exploração predatória tem dizimado reservas florestais próximas aos centros de utilização da biomassa com grave prejuízo para o processo produtivo, para a natureza e para a população local.

A Caatinga tem grande importância socioeconômica por constituir a fonte mais importante de produtos energéticos, tanto para a população como para alguns setores da indústria. A exploração florestal complementa as atividades agropecuárias, sendo uma das poucas alternativas econômicas disponíveis para o produtor rural nos períodos de estiagem (Alves Júnior, 2010).

Riegelhaupt e Pareyn (2010) realizaram estimativas do consumo de energéticos florestais no Nordeste para o ano de 2006 (Tabela 1). A demanda mercantil de lenha e carvão no Nordeste naquele ano ficou na ordem de 25,1 milhões de estéreos (5,3 tMS ou 2,31 TEP) por ano para os setores industrial e comercial, mais 9,4 milhões de estéreos (2 tMS ou 0,86 TEP) para o setor re-

sidencial, totalizando 34,5 milhões de estéreos de lenha comercializados anualmente. No setor industrial, os maiores consumidores são os ramos de cerâmica vermelha, ferro-gusa e gesso, com 40%, 30% e 6% do consumo total, respectivamente. No setor comercial, 50% do consumo está concentrado no ramo de refeições (restaurante, churrascaria e pizzeria) e 30% do consumo no ramo de padaria e confeitaria.

As principais ameaças à conservação da Caatinga devem-se às práticas de atividades como corte de madeira para lenha sem acompanhamento e contínuos desmatamentos para criação de pastagens para bovinos e caprinos (Ferraz, 2011). Em substituição à atual forma de exploração da biomassa, é necessário adotar um sistema mais adequado de manejo florestal, sustentável, no qual as interações das florestas com outros recursos, como água, solo, atmosfera, fauna, conservação da biodiversidade e capacidade de renovação, sejam levadas em consideração (Pareyn, 2010).

Dentre as alternativas possíveis para atender à demanda de lenha, existem o reflorestamento e o manejo sustentável. Os custos iniciais do reflorestamento, seja com eucaliptos (*Eucalyptus globulus* Labill.), seja com essências nativas, variam entre US\$ 700 e US\$ 1.200 por hectare. Considerando que o tempo até a colheita pode variar de 6 a 15 anos, o custo final – incluindo os juros sobre o capital, manutenção do plantio e renda da terra – atinge de US\$ 1.400 a US\$ 2.400 por hectare. Com expectativas otimistas de produtividade para o

Tabela 1. Estimativas de consumo de energéticos florestais no Nordeste em 2006.

| Unidade ⁽¹⁾ | Indústria | Comércio | Domicílio | Total |
|-----------------------------|-----------|----------|-----------|-------|
| Estéreo (x10 ⁶) | 20,0 | 5,1 | 9,4 | 34,5 |
| tMS (x10 ⁶) | 4,2 | 1,1 | 2,0 | 7,3 |
| TEP (x10 ⁶) | 1,8 | 0,5 | 0,9 | 3,2 |
| Mwh (x10 ⁶) | 21,3 | 5,6 | 10,1 | 3,0 |

⁽¹⁾ Estéreo: quantidade de lenha que pode ser empilhada ordenadamente em um metro cúbico; tMS: tonelada de matéria seca; TEP: tonelada equivalente de petróleo; MWh: Megawatt-hora.

Fonte: Riegelhaupt e Pareyn (2010).

Semiárido, o custo do investimento é de US\$ 18 a US\$ 20 por tonelada de matéria seca (Riegelhaupt; Pareyn, 2010).

O MSF da Caatinga associado ao seu reflorestamento nativo, visando à produção de biomassa energética, é a solução ideal para reverter o processo de degradação, além de ser a solução econômica mais viável para a região, superando a pecuária e a agricultura (Melo, 2007).

Para o Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2010), MSF é a administração da floresta para obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo e considerando-se, cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplas espécies madeiras, de múltiplos produtos e subprodutos não madeireiros, bem como a utilização de outros bens e serviços florestais. A oficialização do manejo com os órgãos ambientais é feita mediante plano de manejo florestal sustentável (PMFS), instrumentos de gestão ambiental. O PMFS é um documento técnico que apresenta todas as informações do inventário florestal, os aspectos técnicos do manejo florestal aplicado, como taxa de crescimento, ciclo de corte, produtividade estimada, talhamento, além de toda documentação exigida pela legislação pertinente (Brasil, 2010).

O plano de manejo pode ser organizado em três etapas: 1) zoneamento ou divisão da propriedade florestal em áreas exploráveis, áreas de preservação permanente e áreas inacessíveis à exploração; 2) planejamento das estradas secundárias que conectam a área de exploração às estradas primárias; 3) divisão da área alocada para exploração em blocos ou talhões de exploração anual (Melo, 2007). Para se colocar uma área de Caatinga sob manejo sustentável, é necessário um investimento inicial que varia de US\$ 12 a US\$ 18 por hectare, incluindo-se os custos de formulação e aprovação do plano de manejo e assistência técnica para o seu acompanhamento. Com produtividade média de 2,1 tMS ha⁻¹ ano⁻¹, isto representa de US\$ 6 a US\$ 9 por tonelada de matéria seca, ou seja, duas a três vezes me-

nos que no caso dos plantios florestais (Pareyn, 2010).

A produção de lenha da Caatinga para comercialização direta em uma área sob MSF é pouco atrativa economicamente, por causa dos custos da terra. Os custos podem ser minimizados quando o MFS é implantado em terras próprias sobre a administração de cooperativas, viabilizando a sua comercialização.

Os grandes beneficiários do manejo florestal da Caatinga seriam: 1) o produtor rural, por ter o manejo como uma alternativa produtiva na sua propriedade para gerar renda em base sustentável; 2) a indústria e/ou comércio, por obter a sua fonte de energia de forma legalizada e regularizada; e 3) o Estado, por exercer a gestão sustentável das florestas, gerando emprego e renda e legalizando a produção e o consumo de produtos florestais (Riegelhaupt; Pareyn, 2010).

Num estudo da viabilidade econômica de aproveitamento energético da lenha da Caatinga sob MSF, a única rota tecnológica economicamente atrativa foi a produção de carvão em forno tradicional ou cilíndrico. Para a geração termelétrica a partir de a lenha ser atrativa, são necessários subsídios, como melhor valor pago pela energia e diminuição de impostos durante a sua implantação. Nesse caso, a região poderia ser favorecida com o desenvolvimento socioeconômico do Semiárido, onde já ocorre a exploração predatória da lenha, sem o uso de MSF (Lima Júnior et al., 2015).

Além da produção de lenha e carvão vegetal, a região semiárida pode produzir bioenergia moderna com culturas com alta eficiência no uso da água que serão importantes para o estabelecimento de novos arranjos produtivos locais, como biomassas xerófilas: a palma forrageira [*Opuntia ficus-indica* (L.) P. Mill.] e o agave (*Agave angustifolia*) (Cushman et al., 2015).

A palma forrageira é uma planta da família das cactáceas e há muito utilizada no Brasil para a alimentação de ruminantes. Tem como região de origem o México e foi introduzida no Brasil no final do século 19 (FAO, 2001). No Nordeste do Brasil, são cultivadas principalmen-

te as espécies *Opuntia ficus-indica* e *Nopalea cochenillifera*, que se destacaram como importantes forrageiras na região semiárida, cultivadas em centenas de milhares de hectares (Menezes et al., 2005a). A palma é uma planta com grande capacidade de adaptação ao meio, principalmente por causa de modificações morfológicas e fisiológicas que fazem dela uma das plantas com maior capacidade de produção de biomassa em regiões secas (García de Cortázar; Nobel, 1992).

A melhor adaptação bioquímica à fotossíntese apresentada pela palma a torna mais eficiente no uso da água do que as demais plantas, permitindo ampla reserva de água nos seus tecidos. Dessa forma, sob as mesmas condições de deficiência hídrica, a palma ganha em produtividade comparada com outras plantas (Sampaio, 2005). Em condições favoráveis, a palma pode apresentar valores de produtividade mais altos de que qualquer outra planta, variando de 45 tMS ha ano⁻¹ a 50 tMS ha ano⁻¹ (Nobel, 1995).

A produção de biomassa pela palma, em comparação com outras culturas agrícolas, é estável ao longo do tempo, uma vez que é menos afetada pela irregularidade das chuvas nos períodos de seca. Medidas da produtividade anual de biomassa de palma, em 50 campos de cultivo localizados na região semiárida de Pernambuco e da Paraíba, apresentaram média de 74 t ha⁻¹ de biomassa fresca, enquanto os cinco campos mais produtivos apresentaram média de 170 t ha⁻¹ de biomassa fresca por ano (Menezes et al., 2005b). Dada a sua elevada capacidade de produção de biomassa em zonas secas, a palma pode ser uma fonte de biomassa potencial para produção de bioenergia.

Considerações finais

A busca pela sustentabilidade na região semiárida do Brasil passará pela intensificação da geração e do uso das fontes renováveis de energia. No caso da energia solar, o principal desafio é a redução dos custos de aquisição dos painéis fotovoltaicos, que hoje ainda são elevados. Isso

se deve aos altos impostos no processo de fabricação nacional deles, bem como a redução dos altos custos para instalação. Por sua vez, a energia eólica atingiu um patamar de preço que a torna uma das fontes mais competitivas disponíveis atualmente. Nesse caso, os desafios estão relacionados com a otimização das rotinas de operação e manutenção, para redução dos custos associados e aumento da confiabilidade dos sistemas. Os desafios para a energia de biomassa, explorada na forma de lenha ou de produção de carvão vegetal, são o desenvolvimento de novos sistemas de produção de biomassa, a exploração sustentável e o aproveitamento de bioenergia moderna.

A adoção das tecnologias de geração de energia limpa possibilitará ampliar o desenvolvimento do Semiárido. Tal adoção atinge setores já desenvolvidos, como o industrial e a agricultura de grande porte, os quais poderão ter incrementos, mas chega também a setores menos favorecidos, como agricultura e pecuária de pequeno porte, os quais proporcionariam transformação social e econômica pelo uso de micro e minigeração elétrica distribuída das fontes eólicas e solar. Além disso, aplicações de dessalinização e bombeamento de água e suas tecnologias associadas alinhadas com políticas públicas para a promoção do desenvolvimento socioeconômico regional poderão ser utilizadas para eletrificar domicílios, escolas e atividades de lazer da sociedade.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, DF, 2002. 153 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA (Brasil). Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/proinfa>. Acesso em: 21 jul. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA (Brasil). Resolução Normativa nº 482, de 17 abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de micro geração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 19 abr. 2012. Seção 1, p. 53. Disponível em: http://www.lex.com.br/legis_23200039_RESOLUCAO_

[NORMATIVA_N_482_DE_17_DE_ABRIL_DE_2012.aspx](#). Acesso em: 21 jul. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2 dez. 2015. Seção 1, p. 45. Disponível em: http://www.lex.com.br/legis_27047031_RESOLUCAO_NORMATIVA_N_687_DE_24_DE_NOVEMBRO_DE_2015.aspx. Acesso em: 21 jul. 2018.

ALVES JÚNIOR, F. T. **Biomassa e volumetria de uma área de Caatinga**. 2010. 123 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

ANGELOTTI, F.; SIGNOR, D.; GIONGO, V. Mudanças climáticas no Semiárido brasileiro: experiências e oportunidades para o desenvolvimento. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 484-495, 2015. Número especial.

BALANÇO energético nacional: ano base 2017. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2017. 68 p.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 4. ed. Brasília, DF: MCTI, 2017. Disponível em: <http://educaclima.mma.gov.br/wp-content/uploads/2019/08/Estimativas-Anuais-4-2017.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Projeto cadastro da infraestrutura hídrica Nordeste**: relatório preliminar. Brasília, DF, 2003. 21 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Manejo florestal sustentável 2010**. Disponível em: <http://www.florestal.gov.br>. Acesso em: 20 ago. 2018.

CALDEGAS. Disponível em: <https://caldegas.com.br/aquecedor-de-banho>. Acesso em: 30 mar. 2021.

CAMPOS, J. T. de G. A e A.; MENEZES, H. R.; SILVA, T. dos S.; CERQUEIRA, S. S.; GOMES, S. M. A Energia solar: avaliação do nível de informação sobre o uso da energia solar e sua utilização no Brasil. **Revista Científico**, v. 18, n. 38, jul./dez. 2018.

COELHO, S. T.; MONTEIRO, M. B.; GHILARDI, A.; KARNIOL, M. R. **Atlas de bioenergia do Brasil**. São Paulo: Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2008. 57 p.

CRUZ, P. T. A.; NOGUEIRA, M. F. M. Oportunidades para o desenvolvimento da biomassa energética no Brasil. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p. 37-44, 2004.

CUSHMAN, J. C.; DAVIS, S. C.; YANG X.; BORLAND, A.M. Development and use of bioenergy feedstocks for semi-arid and arid lands. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 14, p. 4177-4193, Apr. 2015. DOI: [10.1093/jxb/erv087](https://doi.org/10.1093/jxb/erv087).

FAO. **Agro-ecology, cultivation and use of cactus pear**. Rome, 1995. 216 p. Edição em português: Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira: tradução do Sebrae/PB, 2001. 2016 p.

FERRAZ, J. S. F. **Análise da vegetação de Caatinga arbustivo-arbórea em Floresta, PE, como subsídio ao manejo florestal**. 2011. 131 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Blucher, 2010. 94 p. (Sustentabilidade, 4).

GUO, M.; SONG, W.; BUHAIN, J. Bioenergy and biofuels: history, status, and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 712-725, Feb. 2015. DOI: [10.1016/j.rser.2014.10.013](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013).

HENRIQUES, R. M. **Potencial para geração de energia elétrica no Brasil com resíduos de biomassa através da gaseificação**. 2009. 207 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

IBGE. **Proporção da população com acesso à energia elétrica no Brasil em 2018**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6590#resultado>. Acesso em: 28 ago. 2019.

LIMA JUNIOR, C.; AGUIAR, R. L. F.; LIBERAL, B.; GUERRERO, J. R. H.; SAMPAIO, E. V. S. B.; MENEZES, R. S. C. Viabilidade econômica do uso energético de lenha da Caatinga sob manejo sustentável. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 156-166, 2015.

LIMA JÚNIOR, C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; LIMA, R. L. F. A.; MENEZES, R. S. C. Potencial de aproveitamento energético de fontes de biomassa no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 2, p. 207-221, 2014.

MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; PEREIRA, E. B. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. **Energy Policy**, v. 48, p. 640-649, Sept. 2012. DOI: [10.1016/j.enpol.2012.05.082](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.082).

MELO, V. T. M. O Manejo florestal visto como um ativo ambiental impulsionador do desenvolvimento local com a geração de emprego e renda. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 9., 2007. Curitiba, **Anais [...]** Curitiba: Abepro, 2007.

MENEZES, R. S. C.; LIMA, J. P. R. (coord.). **Produção de óleos vegetais em Pernambuco para conversão em biodiesel**: diagnóstico e indicação de alternativas. Recife: Universitária da UFPE, 2011. 242 p.

MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H.; SOUZA, F. J. Produtividade de palma em propriedades rurais. In: MENEZES, R. S. C.; SIMÕES, D. A.; SAMPAIO, E. V. S. B. (ed.). **A palma no Nordeste do Brasil**: conhecimento atual e novas perspectivas de uso. Recife: Universitária da UFPE, 2005b. p. 129-142.

- MENEZES, R. S. C.; SIMÕES, D. A.; SAMPAIO, E. V. S. B. (ed.). **A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso**. Recife: Universitária da UFPE, 2005a. 258 p.
- MOREIRA, J. R. S. (org.). **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 420 p.
- NGUYEN, K. Q. Alternatives to grid extension for rural electrification: decentralized renewable energy technologies in Vietnam. **Energy Policy**, v. 35, n. 4, p. 2579-2589, Apr. 2017. DOI: [10.1016/j.enpol.2006.10.004](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.10.004).
- NOBEL, P. S. Recent ecophysiological advances for *Opuntia ficus-indica* and other cacti. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE PROFESSIONAL ASSOCIATION FOR CACTUS DEVELOPMENT, 1., 1995 San Antonio. **Proceeding** [...] Dallas: Professional Association for Cactus Development, 1995. p. 1-11.
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Wood energy: principles and applications**. Itajubá: Núcleo de Excelência em Geração Termoelétrica: Instituto de Engenharia Mecânica, 2002. Disponível em: https://nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/files/Capitulo_1F.pdf. Acesso em: 5 jul. 2018.
- PAREYN, F. G. C. O Papel do Manejo Florestal Sustentável. In: GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. D. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. (ed.). **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**. Brasília, DF: Serviço Florestal Brasileiro, 2010.
- PARO, A. C.; COSTA, F. C.; COELHO, S. T. Estudo comparativo para o tratamento de resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários x incineração. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 2, p. 113-125, 2008.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R. R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017. 80 p.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel: Cresesb, 2014. 529 p.
- PINTO JUNIOR, A. V.; DUTRA, R. M.; ALMEIDA, W. G. de. (coord.). **Atlas do potencial eólico brasileiro: simulações 2013**. Rio de Janeiro: Cepel, 2017. 52 p.
- PORTAL SOLAR. Disponível em: www.portalsolar.com.br. Acesso em: 30 mar. 2021.
- RIEGELHAUPT, E. M.; PAREYN, F. G. C. A Questão energética. In: GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. D. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. (ed.). **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**. Brasília, DF: MMA: Serviço Florestal Brasileiro, 2010. p. 65-75.
- RIO, P.; BURGUILLO, M. Assessing the impact of the renewable energy deployment on local sustainability: towards a theoretical framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 5, p. 1325-1344, June 2008. DOI: [10.1016/j.rser.2007.03.004](https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.03.004).
- RODRIGUES, M. G.; COSTA, F. J. P. Energia e sustentabilidade no século XXI: o caso do Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 3, n. 1, p. 60-79, 2012.
- SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.
- SAMPAIO, E. V. S. B. Fisiologia da palma. In: MENEZES, R. S. C.; SIMÕES, D. A.; SAMPAIO, E. V. S. B. **A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso**. Recife: Universitária da UFPE, 2005. p. 43-63.
- SILVA, J. P. F.; PAREYN, F. G. C.; SOARES, D. G. Manejo florestal sustentável da Caatinga: adequação ambiental e produção de energia agroecológica em projetos de assentamento e propriedades coletivas do plano nacional de reforma agrária. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 4, n. 2, p. 977-980, 2009.
- SIMAS, M.; PACCA, S. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 77, p. 99-116, 2013. DOI: [10.1590/S0103-40142013000100008](https://doi.org/10.1590/S0103-40142013000100008).
- WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **Global bioenergy statistics 2016**. Disponível em <https://worldbioenergy.org/uploads/WBA%20Global%20Bioenergy%20Statistics%202016.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2018.

Planos para o desenvolvimento sustentável do Semiárido brasileiro

Antonio Rocha Magalhães
Marília Castelo Magalhães

Introdução

Vistos superficialmente, os problemas do Semiárido podem ser de fácil solução. Há muitos que advogam soluções parciais, sem levar em conta a complexidade do desenvolvimento. Não faltou quem já dissesse que, se o problema é gente demais, por que não retirar a população para outros lugares? Ou, se o problema é falta de água, por que não guardar a água das chuvas, por exemplo, em grandes açudes? Várias outras soluções isoladas foram sugeridas.

São simplificações que não funcionam. Na verdade, de tudo isso já se fez alguma coisa: migração não é novidade para o habitante do Semiárido; fazer poços, açudes, adutoras e cisternas, tampouco. Fazer irrigação, pesquisa agrícola, montar empresas, transferir recursos para os municípios, transferir recursos para os mais pobres, tudo isso já se fez. O Semiárido não está parado, mas os seus problemas continuam agudos. Na verdade, as ideias parciais podem fazer parte de uma solução de desenvolvimento, mas nada separadamente poderá trazer melhorias sustentáveis definitivas.

São necessárias soluções integrativas, que considerem todos os aspectos relevantes. Já houve casos de experiências abrangentes, como os planos diretores da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (Sudene) e o Projeto Áridas. Mas eles não continuaram por causa da descontinuidade administrativa das mudanças acarretadas pelo processo eleitoral, do sistema político, mas muito mais do que isso. São coisas do passado, mas não deveriam ser.

O Semiárido é uma região diferente. Não há um semiárido, mas vários semiáridos. Só na Caatinga, o ecossistema predominante da região, existem seis unidades de vegetação diferentes (Silva et al., 2012). De modo geral, há dois limites evidentes para o aumento da produtividade no Semiárido. O primeiro é o solo, geralmente raso, muitas vezes com pedras aflorando. O segundo, e mais sério, é a escassez de água. Junte-se a isso a incerteza climática: em alguns anos de seca, a falta de água é muito severa e afeta a vida e as atividades das pessoas. Por definição, as possibilidades de desenvolvimento não são as mesmas de uma região úmida, sem restrição de solo e água, e sem tanta incerteza climática. O risco de investir na agricultura, por exemplo, é enorme, por causa das secas periódicas.

Apesar disso, o Semiárido foi uma região ocupada logo no início da história colonial, a partir do século 17, em complementação à Zona da Mata, onde se produzia o açúcar tão cobiçado pelos europeus. Inicialmente, foram formadas grandes fazendas para a criação de gado, com base nas sesmarias concedidas pela Coroa Portuguesa. A população cresceu e, com ela, a formação de um exército de reserva que alimentou a pobreza regional. A exploração dos recursos naturais não levou em conta preocupações de conservação ambiental, tendo como resultante, ao longo do tempo, o desmatamento da Caatinga – a vegetação típica –, a degradação do solo e a desertificação.

Este capítulo tem por objetivo discutir aspectos do modelo histórico de desenvolvimento do Semiárido e da sua ocupação, bem como das principais políticas públicas levadas a efeito pelo governo federal e pelos governos estaduais. Ênfase é dada ao período mais recente, com

a criação da Sudene, a partir de 1959, quando o problema regional se traduziu em planos governamentais para o seu desenvolvimento, sobretudo para a industrialização regional (Magalhães, 1983). Finalmente, nas conclusões, apresentam-se o desafio atual da região semiárida e as questões principais que precisam ainda ser enfrentadas pela sociedade brasileira e regional para reduzir as disparidades e erradicar a pobreza que afeta a maioria das pessoas que vivem nesse espaço brasileiro.

Modelo tradicional nada desenvolvimentista

A civilização do couro, na denominação do historiador Capistrano de Abreu (Abreu, 1998), marcou a vida do sertanejo, o nome dado ao habitante do Sertão semiárido. A ocupação por grandes fazendas de criação de gado se deu de forma complementar à economia canavieira. Os produtos do boi – dos quais tudo se aproveitava – eram inicialmente o único artigo de troca que sustentava as atividades da fazenda. Foi necessário produzir alimentos, especialmente feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), milho (*Zea mays* L.) e mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), para a subsistência de uma população cada vez maior e dependente do dono da terra. As atividades da fazenda floresciam em anos chuvosos normais, acomodavam-se em anos de secas leves e desmoronavam em casos de secas severas.

Fazendeiros e trabalhadores – os moradores – residiam na fazenda. Criou-se uma sociedade em que moradores dependiam dos fazendeiros, inclusive politicamente. A figura dos vaqueiros tornou-se lendária, com alguma possibilidade de emancipação por conta da participação que tinham na atividade pecuária. Alguma, mas não muita: o fazendeiro continuava sendo o rei, ou melhor, o coronel. Em muitos lugares, de cada cinco crias, uma pertencia ao vaqueiro. Isso era uma maneira de compensar uma atividade difícil e perigosa, uma labuta de sol a sol tangendo o gado no meio da Caatinga e de árvores espinhosas.

Só mais tarde, já no final do século 18, surgiu o algodão (*Gossypium hirsutum* L.) como atividade que tinha um mercado internacional e que gerava renda para os agricultores. O trinômio boi-algodão-subsistência construiu uma sociedade estável, apesar de pobre, por mais de dois séculos, exceto durante as crises de grandes secas. Nesse trinômio, o morador produzia para subsistência e cuidava das roças de algodão do fazendeiro, enquanto o vaqueiro, que também era morador, tratava do gado. Não raro, a plantação de algodão era “de meia”, o que dava aos trabalhadores alguma renda monetária. O trinômio se quebrou quando a atividade algodoeira foi mortalmente atingida pela praga do bicudo-do-algodoeiro (*Anthonomus grandis*), já nos anos 1980 do século 20. Sem um dos tripés, a economia do Semiárido cambaleou e caiu. O ressurgimento da cultura do algodão, de forma tecnificada e com alta produtividade, não mais pertencia ao mundo dos pequenos agricultores. O algodão ressurgiu como atividade capitalista, avançando sobre os campos dos Cerrados no oeste da Bahia, e deixando de ser a atividade que assegurava a sustentabilidade financeira de proprietários de terra e pequenos agricultores do Semiárido.

Tomando-se emprestado dos costumes dos indígenas locais, as atividades de fazendeiros e moradores eram complementadas pela coleta de produtos fornecidos pela floresta, como a oiticica (*Licania rígida* Benth), a carnaúba [*Copernicia prunifera* (Mill.) H.E.Moore] e as frutas silvestres, e pela pesca onde havia água (especialmente nos rios São Francisco e Parnaíba, depois nos açudes construídos pelo governo e pelos donos de terra). O corte de madeira para construção de cercas, para produção de lenha e de carvão e para limpeza do terreno para agricultura e pecuária sempre constituiu importante atividade extrativista, geralmente feito de forma insustentável, contribuindo para a degradação ambiental e a desertificação. Deve-se destacar que não apenas a agropecuária é responsável pelos fatores que causam degradação, mas também a construção de infraestrutura hídrica e de transportes, o uso da terra

para indústrias e para expansão das cidades, a mineração e a produção de energia, sem a internalização de custos ambientais.

Como pano de fundo, o problema das secas. Em anos normais, o Semiárido propiciava condições razoáveis de produção. O sertanejo aprendeu a amar a chuva. Os anos de fartura levavam ao esquecimento dos anos de seca. Isso foi posteriormente denominado, por um professor americano, como “o ciclo hidro-ilógico das secas” (Wilhite, 2012): um período de anos molhados leva os agricultores a pensar que não tem mais seca e, com isso, exploram os recursos naturais para além de sua capacidade. Quando vem uma nova seca, os recursos naturais existentes não podem suportar aquele nível de atividades. Dá-se, então, a ruptura, com enormes impactos sobre a produção agrícola, pecuária, sobre a biodiversidade e sobre a vida das pessoas.

Os anos de seca sempre voltam. Os registros de secas e de seus impactos no Semiárido são impressionantes. A grande seca de 1877–1879 matou cerca de 800 mil pessoas, segundo um relato do naturalista americano Herbert Smith (Smith, 1879). Essa grande seca foi romantizada por Rodolfo Teófilo, em seu livro *A Fome* (Teófilo, 1890). Outras secas se seguiram, também devastadoras, como em 1900, 1915, 1932, 1958, 1979–1983, 2010–2017. A seca de 1915 foi imortalizada no romance *O Quinze*, de Rachel de Queiroz (Queiroz, 1930).

A frequência de secas e seus impactos aumentaram no século 20 e no século 21, tanto pelas causas climáticas – o clima errático do Semiárido – como também pelo aumento da pressão sobre os recursos naturais advinda da maior ocupação humana e da devastação da Caatinga e das fontes de água. A grande seca mais recente, que começou em 2010 (embora 2011 não tenha sido um ano seco), causou imensos impactos sobre a população, em todos os estados do Nordeste (Martins; Magalhães 2015; Martins et al., 2017). Em todas essas grandes secas, não apenas as atividades pereciam por causa da falta de água, mas também os animais domésticos e selvagens e as pessoas.

Crescimento populacional e as migrações

O processo de ocupação representa uma transformação muito grande nas condições naturais do Semiárido. Essa transformação evoluiu lentamente desde meados do século 17. Foi, contudo, em meados do século 20 que surgiram as maiores transformações sociais e ambientais. Até essa época, as condições de vida no Sertão eram, de certa forma, similares: as pessoas viviam em sua maioria no meio rural, não tinham saneamento básico, as estradas também não existiam ou eram precárias. A água da chuva era colhida e consumida, ou armazenada em cisternas e em açudes. Os leitos dos rios tinham um lençol freático próximo à superfície, facilitando a abertura de cacimbas a 1 m, ou menos, da superfície. Nos anos de seca, essas fontes de água se tornavam mais escassas e, em certos lugares, poderiam desaparecer.

Em 1960, a população rural do Nordeste ainda equivalia a duas vezes sua população urbana. De um total de 22,3 milhões de habitantes, 14,7 milhões viviam na zona rural e 7,7 milhões nas cidades. Essa situação se inverteu a partir da década de 1980, quando a população rural e a urbana regionais se equivaliam. Em 2010, a população total, segundo o Censo Demográfico do IBGE, era de 53 milhões, sendo 38,8 milhões nas áreas urbanas e 14,3 milhões nas áreas rurais. Ou seja, a população rural representava apenas pouco mais de um terço da população urbana. Essa situação continua (IBGE, 2015). Isso reflete a maior criação de empregos nas cidades pequenas e médias e, de certa forma, a estagnação da economia rural. De qualquer forma, trata-se de uma tendência nacional e mundial, com aumento das populações urbanas. O que caracteriza uma região com baixo índice de desenvolvimento humano (IDH), como o Semiárido, é a incapacidade das cidades de absorverem produtivamente os trabalhadores liberados pelo campo.

Junto com o crescimento populacional e a urbanização, veio a transformação nas relações sociais. A penetração da previdência rural no

campo de um lado trouxe benefícios para os trabalhadores e, de outro, aumentou o custo do emprego e forçou fazendeiros a dispensar moradores, que passaram a viver em periferias de pequenas cidades ou em pequenas comunidades. Melhores meios de transportes e mudanças nos estilos de vida fizeram com que fazendeiros se mudassem para as cidades, muitas vezes para as capitais. Por tudo isso, é comum atualmente a presença de casarões abandonados nas fazendas do Sertão. A falta de uma agricultura viável afastou os investimentos no campo; as fazendas se esvaziaram, as cidades cresceram sem ter uma infraestrutura adequada para receber seus novos habitantes. Os sistemas de valores da vida rural se romperam; o crescimento populacional nas cidades e a falta de oportunidades levaram as pessoas a buscar outros afazeres e a se desapegar de valores tradicionais.

Em relação à estrutura fundiária, o processo hereditário e o aumento populacional nas fazendas levaram, inicialmente, à maior divisão das propriedades e à criação de minifúndios para abrigar a população pobre. Predominou um sistema de convívio entre latifúndio e minifúndio. Este último era mais vulnerável a secas e nem sempre, mesmo em anos normais, assegurava uma produção adequada para os seus habitantes. Os que moravam nos minifúndios e nas pequenas comunidades funcionavam como exército de mão de obra de reserva para as atividades nas fazendas. Tudo indica que não houve modificações significativas nos últimos anos. Em verdade, estudo recente do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (Ipece), analisando censos agropecuários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 1970 a 2006, informa sobre a persistência de forte concentração da posse da terra nos anos estudados (Medeiros, 2010). Não obstante as políticas de governo para apoiar os agricultores e trabalhadores rurais, inclusive a reforma agrária que transformou muitos latifúndios em assentamentos rurais (ver seção sobre intervenções governamentais, adiante), a situação de pobreza permaneceu elevada, embora tenha se reduzido em termos relativos. O Nordeste rural continua a ser o maior bolsão de pobreza do País.

Intervenção governamental

Durante muitos anos, não houve uma política para o desenvolvimento do Semiárido. Só quando os impactos da seca repercutiram na capital da República, especialmente ao final do século 19, os governantes começaram a olhar mais seriamente para os problemas do Sertão. Inicialmente eram ações apenas assistenciais aos flagelados atingidos pelas secas. A construção de grandes reservatórios para armazenar água só avançou a partir da primeira metade do século 20, embora a construção do primeiro grande açude ainda tenha sido decidida pelo imperador Dom Pedro II, após a grande seca de 1877. A fase hídrica, com a construção de inúmeros açudes, foi impulsionada pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) – criado pela Inspectoria de Obras Contra as Secas (IOCS), em 1909 – e teve grande importância para ajudar a manter uma população no interior do Nordeste. A nova civilização do Nordeste urbano foi possível por causa da acumulação de água propiciada pelo DNOCS, pelos governos estaduais e pelos proprietários rurais.

Só a partir da década de 1950, pode-se efetivamente falar em políticas de desenvolvimento regional, tendo como precursores a criação da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf), em 1948, e do Banco do Nordeste do Brasil (BNB), em 1952. Os estudos do Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (BNB/Etene) contribuíram para uma nova visão que desembocou na criação da Sudene, em 1959. O documento escrito pelo economista Celso Furtado, conhecido como relatório do Grupo de Trabalho para o Desenvolvimento do Nordeste (GTDN), *Uma Política de Desenvolvimento Econômico para o Nordeste* (Sudene, 1959), advogava a industrialização e a reorganização da economia do Semiárido, com migração de excedentes populacionais para áreas de colonização na Pré-Amazônia maranhense. Os planos diretores da Sudene tentaram apoiar essa política, promovendo incentivos fiscais para novas indústrias e projetos de colonização

no Maranhão. O diagnóstico feito pelo GTDN continua válido, no tocante à pobreza e excedente populacional, e o Semiárido continua carente de uma política de desenvolvimento.

Fase de desenvolvimento econômico

O GTDN desenvolveu uma visão global da questão nordestina e indicou um plano de ação com quatro pontos: a) industrialização; b) produção de alimentos na zona úmida; c) reorganização da economia semiárida, aumentando produtividade e tornando-a mais resistente às secas; e d) desenvolvimento da fronteira agrícola no “hinterland” maranhense para absorver os excessos de população do Semiárido (Sudene, 1959).

O relatório do GTDN deu consistência aos quatro planos diretores (PDs) da Sudene, aprovados por lei do Congresso Nacional em 1961, 1963, 1965 e 1968. Depois veio o Plano de Desenvolvimento do Nordeste, para o período 1972–1974, como parte do I Plano Nacional de Desenvolvimento (I PND). Embora os PDs não tenham sido bem-sucedidos, eles sempre incluíram a diretriz de reorganização da economia do Semiárido em seus principais objetivos. O mais importante é que novos recursos foram criados.

As leis que aprovaram o I e o II PDs criaram o sistema de incentivos fiscais para a indústria e os projetos agrícolas, injetando recursos novos no desenvolvimento regional. Segundo esse sistema, que ficou conhecido como 34/18, números dos artigos das respectivas leis, qualquer empresa no território nacional poderia optar por aplicar até 50% do imposto de renda devido em investimentos industriais ou rurais no Nordeste. Isso implicou um aporte considerável de recursos para a Sudene em projetos para o desenvolvimento regional. É natural que, diante da existência de novos recursos, outros olhos se abrissem no desejo de angariar uma parte. O mesmo sistema foi expandido para a Amazônia (Sudam, em 1963), Reflorestamento

(1966), Pesca (1967) e Turismo (1968). Em 1985, quando se iniciou a Nova República, o Instituto de Planejamento (Iplan) do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) fez uma ampla avaliação dos incentivos fiscais e recomendou mudanças. Em consequência, alguns dos incentivos setoriais foram suspensos (pesca, turismo, reflorestamento), mudando-se a sistemática para aplicação em projetos agrícolas na Amazônia e no Nordeste (Ipea, 1985).

Os incentivos fiscais do sistema 34/18 foram extintos pela Lei nº 9.532/1997, que determinou o ano de 2013 como seu prazo final. Persistem incentivos de redução do imposto de renda a pagar por empresas que se implantam no Nordeste. Em 1988, a nova Constituição criou os Fundos Constitucionais de Desenvolvimento, entre os quais o Fundo Constitucional para o Desenvolvimento do Nordeste (FNE), que deveria sempre aplicar 50% dos seus recursos em projetos produtivos para o desenvolvimento do Semiárido. O FNE é administrado pelo BNB, seguindo diretrizes da Sudene e do Ministério do Desenvolvimento Regional (MRE), e se constitui atualmente na principal fonte de recursos para o desenvolvimento regional no Nordeste, na forma de crédito subsidiado.

Programas especiais para o desenvolvimento do Nordeste

O ano de 1970 foi de seca severa no Nordeste. Nesse ano, o presidente da República era o general Emílio Garrastazu Medici que, ao visitar o Nordeste, disse dramaticamente no Conselho Deliberativo da Sudene: “Vim ver a seca e vi a miséria” (Medici, 1970). Resolveu criar uma solução para os problemas do Semiárido: construir a Rodovia Transamazônica como via de penetração da Amazônia, para que o excedente de população do Semiárido pudesse emigrar. E fazer projetos de colonização e irrigação no Nordeste, para criar oportunidades de emprego. Onde haveria dinheiro para financiar um

novo programa? A solução foi focar nos incentivos fiscais. Ficou resolvido que 50% dos incentivos fiscais do art. 34/18 deveriam ir para o Programa de Integração Nacional (PIN) e o Programa de Redistribuição de Terras e de Estímulo à Agroindústria do Norte e do Nordeste (Proterra). O PIN/Proterra financiou a Transamazônica e depois constituiu fonte de recursos para os programas especiais no Nordeste e na Amazônia (Carvalho, 2014).

Os programas especiais significaram uma guinada na política de desenvolvimento regional no Brasil, na década de 1970 e seguintes, até os anos 1990. Chegou a haver um grande número de programas especiais para todas as regiões, todos coordenados a partir de Brasília. No Nordeste, o destaque vai para o Programa de Desenvolvimento de Áreas Integradas do Nordeste (Polonordeste) e o Projeto Sertanejo, cujo auge aconteceu nos anos 1980.

Polonordeste

O Polonordeste foi o primeiro programa especial, criado em 1975, seguindo uma estratégia de desenvolvimento rural integrado. Do ponto de vista teórico, era uma proposta muito consistente. Considere-se uma comunidade no Semiárido, com certo número de famílias e de pequenas propriedades. A ideia seria apoiar simultaneamente cada família com um conjunto de segmentos produtivos, incluindo assistência técnica e tecnologias apropriadas; segmentos de infraestrutura, incluindo estradas (ligação com o mercado) e acesso à energia elétrica; segmentos de apoio à comercialização, incluindo compra da produção e preços mínimos; e ações sociais, incluindo educação, saúde e saneamento rural. No começo dos anos 1970 não se podia falar abertamente em reforma agrária e combate à pobreza, mas posteriormente esses foram termos agregados à estratégia. Essas ações deveriam chegar ao mesmo tempo e beneficiar diretamente o público-meta, os pequenos produtores e moradores do campo. Em outras palavras, o pequeno produtor teria acesso à terra e aos demais meios de produção, à pesquisa

adaptada e ao mercado. Também teria acesso a melhores condições de vida, à educação, à saúde e ao saneamento básico.

O Polonordeste era composto de Projetos de Desenvolvimento Rural Integrado (PDRIs). Cada PDRI focava uma área e uma população. Chegou a haver cerca de 50 PDRIs em todo o Nordeste, em todos os estados. Novas instituições não deveriam ser criadas, mas se esperava que todas as instituições existentes, federais e estaduais, deveriam atuar de forma coordenada. O programa contou inicialmente com o apoio do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e do Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento – ou Banco Mundial (Bird), e da assistência técnica do Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA). Após a primeira geração de projetos, o BID resolveu deixar de ser um dos financiadores, mas o Bird continuou a financiar os PDRIs e passou a ser o grande promotor dos projetos de desenvolvimento rural integrado. Todos os estados do Nordeste, mais o norte do estado de Minas Gerais, chegaram a ter projetos do Polonordeste. Aqueles projetos que contavam com fonte mais estável de recursos, como o Bird, tiveram vida mais longa. A maior estabilidade desses projetos devia-se não apenas ao apoio financeiro de uma instituição internacional, mas, sobretudo, aos vínculos contratuais que se desenvolviam.

Na prática, contudo, a estratégia não funcionou bem. Era muito difícil assegurar que todas as instituições atuassem conjuntamente. Os arranjos administrativos eram muito complexos: Ministério do Planejamento, Ministério do Interior, outros ministérios e órgãos setoriais, Sudene, governos dos estados, órgãos estaduais; não havia como fazê-los chegar conjuntamente ao nível dos pequenos produtores. O valor dos projetos era pequeno em comparação com o orçamento de cada instituição setorial, de modo que não valia a pena, do ponto de vista da instituição setorial, montar uma estrutura especial para chegar aos projetos. Em vez disso, os órgãos executores usavam os recursos para pagar salários ou atender a suas próprias prioridades. Com isso, a maior parte dos recursos não chegava ao fim da

linha. Os fluxos financeiros eram tortuosos: uma autorização de liberação de recursos federais poderia envolver muitos passos e levar pelo menos 3 meses até chegar ao seu objetivo final, conforme se constatou na época de construção do Projeto Nordeste, no início da década de 1980 (Miranda, 1991). Em 1993, o Departamento de Avaliação do Bird publicou uma avaliação da professora Judith Tandler, do Massachusetts Institute of Technology (MIT). Ela visitou projetos de desenvolvimento rural integrado no Ceará e em outros estados do Nordeste e conversou com muitas pessoas, desde governadores até beneficiários dos projetos. Suas conclusões estão contidas em um documento chamado *New Lessons from Old Projects (Novas Lições de Projetos Antigos)*. Surpreendentemente, ela encontrou aspectos positivos e inovadores em setores isolados, como na construção de projetos locais de saneamento básico, na infraestrutura e no crédito rural (Tandler, 1993). Mas a estratégia de integração de todos os componentes não era alcançada, isto é, não houve lugar onde todos os componentes fossem executados com eficiência de modo a transformar cada família em produtor agrícola com renda mais elevada e sustentável.

Projeto Nordeste e os Projetos de Apoio à Pequena Produção

De 1979 a 1983 houve uma seca prolongada no Nordeste, a qual culminou com escassez severa de chuvas em 1983 e com novo questionamento sobre os programas de governo. Por iniciativa do Ipea/Iplan, e do Bird, o Projeto Nordeste, então definido, avaliou a estratégia do Polonordeste e de outros programas especiais, chegando a algumas conclusões interessantes (Projeto Nordeste, 1984; Miranda, 1991). Primeiro, a estratégia de desenvolvimento rural integrado, com 10 a 15 segmentos, é muito complexa e inviável, por conta das dificuldades de operacionalização – não foi possível coordenar tantas instituições. Segundo, apesar disso, em termos teóricos a ideia dessa estratégia continua válida.

Segundo a estratégia de desenvolvimento rural, para alavancar uma família rural da pobreza é preciso chegar de uma vez ao produtor rural com todos os elementos de: a) acesso à terra e apoio à produção; b) acesso a mercados; c) acesso aos serviços sociais de educação, saúde, e de abastecimento de água.

O Projeto Nordeste propunha, então, em seu relatório final, que fossem integrados apenas os segmentos produtivos: acesso à terra, assistência técnica, pesquisa adaptada, crédito rural, comercialização, infraestrutura. Isso deu origem aos Projetos de Apoio à Pequena Produção (PAPPs) (Miranda, 1991). As questões sociais deveriam ser abordadas mediante programas setoriais abrangentes, realizados pelos respectivos ministérios e organizações setoriais: educação, saúde, saneamento rural (acesso à água). O Projeto Nordeste previa, portanto:

- Um projeto integrado chamado PAPP, para apoiar diversos segmentos voltados para a produção rural. O número de componentes que deveriam ser integrados se reduziria, então, de aproximadamente 15 para 5 ou 6.
- Um programa de regularização fundiária e acesso à terra, chamado Programa de Desenvolvimento do Sistema Fundiário do Nordeste (PDSFN), que deveria assegurar o acesso à terra aos agricultores sem-terra, bem como regularizar as terras dos pequenos produtores.
- Um grande programa de educação rural, outro de saúde, outro de saneamento rural, independentes do PAPP, a ser executados pelas respectivas instituições setoriais.

A estratégia dos PAPPs foi adiante com vários projetos, contando com o apoio do Bird. Contudo, ainda assim permanecia complexa a sua administração, com inúmeros interlocutores e um mecanismo tortuoso de trânsito de recursos. Apesar do esforço para implementação de alguns PAPPs, baseados na estratégia do PDRI, bem como do apoio institucional e financeiros

do Bird, os caminhos institucionais continuavam sinuosos. A estratégia de execução continuava complexa, com os recursos federais sendo canalizados por meio da Sudene e de ministérios setoriais, até chegar aos órgãos executores locais. Poucos recursos chegavam ao objetivo final de beneficiar os pequenos agricultores. Também não havia apoio político dos governadores para os PAPPs, porque as decisões dependiam da Sudene e do Bird.

Diante de nova seca no início da década de 1990, e da falta de apoio político para a estratégia do PAPP, o então Ministério do Planejamento juntamente com o apoio do Bird e com a participação ativa de vários governos estaduais e da Sudene promoveram uma mudança drástica na forma de operação dos programas de combate à pobreza rural no Nordeste. Uma comitiva liderada pelo Ministério do Planejamento visitou o Programa Solidariedade no México, inclusive projetos comunitários em municípios de vários estados. Ainda durante a viagem, governadores, superintendente da Sudene, Ministério do Planejamento e Bird resolveram mudar de estratégia e adotar o conceito de projetos orientados pelas comunidades. Em vez de projetos integrados, os novos projetos deveriam ter um só componente, os recursos deveriam ser descentralizados, a responsabilidade de execução deveria pertencer a órgãos locais, como no caso do Programa Solidariedade.

Projetos de desenvolvimento comunitário

Criou-se então o Programa de Combate à Pobreza Rural (PCPR) por meio de apoio direto às comunidades rurais. A principal mudança é que os novos projetos deveriam ser comunitários e o fluxo de recursos deveria ir direto para as comunidades, em vez de ir via instituições setoriais. Os projetos deixaram de ser federais e passaram a ser estaduais, isto é, os estados se tornavam mutuários do Bird e alocavam a

contrapartida. Dez por cento dos recursos deveriam vir diretamente das comunidades, na forma de trabalho. A Sudene renunciou à ideia de intermediar todos os recursos e aprovar cada projeto, conservando, entretanto, a atividade de avaliação, que acabou não desempenhando de forma adequada. Os estados, e não mais o governo federal, seriam responsáveis pelos novos projetos. A nova estratégia de projetos comunitários começou a ser implementada em 1994 e persistiu durante longo tempo, beneficiando subprojetos definidos pela própria comunidade, com base em suas prioridades. Com isso, foram executados milhares de projetos de saneamento básico rural e de acesso à energia elétrica, entre outros. Em comparação com os PAPPs, os PCPRs eram de execução mais bem definida, os recursos iam diretamente para as comunidades (para subprojetos aprovados pelos estados) e a implementação era mais ágil. Em compensação, as comunidades elegiam uma atividade de cada vez, por exemplo, abastecimento de água ou eletrificação rural, e não várias atividades integradas como no PAPP. Os PCPRs ganharam em agilidade e perderam em poder de transformação. O poder de penetração também aumentou. O então governador do Ceará entre 1995 e 2002, Tasso Jereissati, falou uma vez que o PCPR era o único instrumento disponível para chegar no nível das comunidades. No início de século 21, cerca de 45% da população rural residente no Semiárido chegou a ser atendida por ações dos PCPRs, de acordo com dados calculados com base em informações do IBGE sobre população nos municípios e beneficiários do PCPR constantes de documentos elaborados pelo escritório do Bird na Sudene (Magalhães, 2000).

Projeto Sertanejo

A concepção do Programa Especial de Apoio ao Desenvolvimento da Região Semiárida do Nordeste (Projeto Sertanejo), lançado em 1976 pelo governo brasileiro, também era muito interessante. Tratava-se de propiciar um ponto de água (o fator mais escasso) em cada proprieda-

de rural e reorganizar as atividades da fazenda em torno do ponto de água. Nesse sentido, o Projeto Sertanejo atingia diretamente as propriedades no Semiárido, abordando uma questão crucial que é a hídrica. Ele ajudava na preparação de projetos e financiava investimentos nas propriedades.

O Projeto Sertanejo contava com mais de 100 núcleos disseminados pelos estados. Entidades executoras, responsáveis pelos núcleos, podiam ser o DNOCS (em que este tinha projetos de irrigação), a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (Codevasf) e as secretarias de Agricultura. A coordenação geral cabia à Sudene. Cada núcleo representava certo número de municípios – por exemplo, Núcleo de Iguatu (Ceará), Núcleo de Sousa (Paraíba), Núcleo de Ouricuri (Pernambuco), e assim por diante. Cada núcleo tinha um coordenador e contava com uma equipe de 13 técnicos de nível superior, encarregada de elaborar e acompanhar os projetos. Em 1978, uma equipe da Embrapa/CPATSA (como então se chamava a Embrapa Semiárido) percorreu 20 núcleos em 8 estados do Nordeste, onde aplicou um questionário detalhado para identificar as características de cada núcleo.

Os proprietários, distribuídos em três categorias conforme o tamanho da propriedade (0 ha a 10 ha, 11 ha a 100 ha e 101 ha a 500 ha), se inscreviam para participar do projeto e tinham seus projetos de investimento, custeio ou crédito fundiário elaborados pelos técnicos do Projeto Sertanejo (na prática, apenas os projetos de investimento avançaram). Os proprietários selecionados, após aprovação de seus projetos pela Sudene, tinham acesso a crédito subsidiado para a respectiva implementação.

Embora contemporâneos do Polonordeste e gerenciados ambos os programas pela Sudene, havia pouca comunicação entre um e outro. Na verdade, enquanto a iniciativa do Polonordeste partira de Brasília, a do Projeto Sertanejo era da própria Sudene.

O Projeto Sertanejo perdurou até que a avaliação promovida pelo Projeto Nordeste recomen-

dasse a fusão de todos os programas especiais na região e a criação do PAPP e dos programas setoriais descritos anteriormente. Após o Projeto Nordeste, contudo, a Sudene capitaneou a criação de novos programas, como o Programa Padre Cícero, que financiava obras hídricas nos diversos estados, e o Programa São Vicente, para apoiar projetos comunitários (Projeto Áridas, 1994).

Questão fundiária

A questão fundiária sempre foi apresentada como um problema para o desenvolvimento do Semiárido (e do Nordeste), por causa das grandes desigualdades entre minifúndios, onde se concentra a pobreza, e latifúndios. Durante grande parte do período de governo militar, não se podia falar abertamente em pobreza e reforma agrária (embora o Estatuto da Terra tenha sido uma das primeiras medidas naquele período). Por isso, quando foi lançado o Polonordeste não havia um componente de acesso à terra, embora isso fosse essencial para sua lógica. O Programa de Desenvolvimento do Sistema Fundiário Nacional (PDSFN), com apoio do Bird, foi preparado no último governo militar e abortado nos anos seguintes. Em termos de concepção do Projeto Nordeste, o PDSFN deveria ser o componente de acesso à terra do PAPP. Esta, contudo, foi uma área não imune a ideologias, que podem ter inibido a questão objetiva de como promover o acesso à terra. O programa de reforma agrária deveria ser feito com base na expropriação de latifúndios, de forma conflituosa, posteriormente paga com recursos públicos. Tentativas de funcionamento de programas de crédito fundiário, como o Programa de Reforma Agrária Solidária, ou reforma agrária amiga do mercado, como se chamava, enfrentaram dificuldades ideológicas para sua realização.

A redistribuição de terras aconteceu de fato em muitas partes do Nordeste, com a transformação de grandes propriedades em projetos de reforma agrária. O primeiro desses projetos foi o da Fazenda Japura, no município de Canindé, no estado do Ceará, onde também ocorreu, em

1971, o primeiro conflito armado entre posseiros e a polícia, do qual resultaram vários mortos (Barros, 2013). Atualmente, há inúmeros projetos de assentamento espalhados pelo Nordeste. Alguns desses projetos encontraram uma saída para ocupação da população, mas muitos começaram por desmatar o terreno e agredir o meio ambiente. Um seminário promovido pela Fundação Esquel Brasil em 1998, em Fortaleza, CE, concluiu que:

Até agora a política de reforma agrária não tem levado em conta a questão ambiental. Em alguns casos, como na Amazônia, a reforma agrária tem estimulado o desmatamento desnecessário, na medida em que o exige para poder declarar produtiva a terra em apreço. Em outras regiões, como no Nordeste, não tem havido preocupações ambientais nos assentamentos. Uma maior articulação entre as políticas ambiental e fundiária poderá reduzir sensivelmente este problema (Brasil, 2000).

Mais recentemente, essa situação mudou para melhor, uma vez que passou a existir mais preocupação ambiental na política fundiária. Entretanto, o problema persiste, porque não se descobriu ainda como evitar ou compensar impactos ambientais quando uma larga área de terra conservada é dividida em pequenos lotes.

Ideia de desenvolvimento sustentável

O conceito de desenvolvimento sustentável foi lançado em 1987, com o *Relatório Brundtland* (World Commission on Environment and Development, 1987). O conceito foi reforçado em 1992 com a realização no Rio de Janeiro da *Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente (Rio-92)*, que aprovou a Declaração do Rio e a Agenda 21, com diretrizes para o alcance da sustentabilidade. No tocante às regiões secas, foi realizada a *I Conferência Internacional sobre Variações Climáticas e Desenvolvimento Sustentável em Regiões Semiáridas* (ICID) (Ribot et al., 1996), a qual forneceu a base técnica para que, na *Rio-92*, fosse feita a recomendação para uma convenção sobre comba-

te à desertificação. Finalmente, em 1994, foi lançada a Convenção das Nações Unidas sobre Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos de Secas (UNCCD), à qual o Brasil aderiu em 1997. Mais recentemente, em 2017, os chefes de Governo e de Estado aprovaram, nas Nações Unidas, a Agenda 2030, com os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Nações Unidas, 2015).

O conceito de desenvolvimento sustentável, embora ainda elusivo, aos poucos tomou conta dos discursos políticos e das propostas técnicas, mesmo continuando inalcançado. Há um esforço em todas as áreas no intuito de incorporar componentes ambientais nas propostas de políticas. Com a continuação, avançaram propostas de pagamento por serviços ambientais, recuperação de fontes de água e de vegetação ciliar, uso sustentável da terra e manejo sustentável da água. Propostas, apenas, com experiências ainda de pouca repercussão: mas isso significa que já há instrumentos disponíveis para a implementação de políticas mais agressivas em direção à sustentabilidade.

Projeto Áridas: território mais população mais atividades

Uma das recomendações da *ICID*, contida na Carta de Fortaleza, foi a de adotarem-se planos de desenvolvimento sustentável para as regiões semiáridas do planeta (Ribot, 1996). No Brasil, essa recomendação transformou-se no Projeto Áridas, que buscava uma estratégia para o desenvolvimento sustentável do Nordeste semiárido. O Projeto Áridas foi amplamente negociado entre os estados e o governo federal, entre 1992 e 1994, e o seu planejamento foi desenvolvido em 1994 e 1995 sob a coordenação de um Conselho de Secretários de Planejamento dos Estados e do Ministério do Planejamento.

A metodologia de desenvolvimento sustentável proposta pelo Projeto Áridas incluía os seguintes elementos:

- Uma definição operacional de sustentabilidade: projeto sustentável é aquele cujos resultados são permanentes, isto é, ele não reduz a quantidade de recursos naturais e beneficia de modo permanente a população.
- O desenvolvimento sustentável pode ser visto sob quatro dimensões: ambiental, social, econômica e político-institucional.
- Uma estratégia abrangente de desenvolvimento sustentável deve considerar: análise da situação atual de sustentabilidade, considerando-se o risco climático; análise de cenários tendenciais, considerando-se os caminhos previsíveis da ciência e da tecnologia; cenários desejados, construídos de forma participativa; da comparação entre esses três momentos, pode ser definida a estratégia que mais se aproxima da sustentabilidade.
- Estudos e cenários para cada setor prioritário considerado no projeto, baseados em indicadores de sustentabilidade.

O Projeto Áridas foi um marco importante para construir uma metodologia de planejamento do desenvolvimento sustentável, para consolidar a ideia de sustentabilidade em diversos setores e áreas políticas, como recursos hídricos e planejamento estadual. A maior parte dos especialistas do Nordeste, de diversas instituições e universidades, participou efetivamente e pôde dar continuidade aos seus trabalhos, levando em conta a ótica da sustentabilidade (Projeto Áridas, 1995).

O Projeto Áridas teve papel relevante na introdução do conceito de sustentabilidade no planejamento brasileiro. O planejamento estadual foi influenciado diretamente, com vários planos de desenvolvimento sustentável sendo postos em prática no Ceará, na Bahia, em Pernambuco, no Maranhão, no Rio Grande do Norte e na Paraíba, além de Rondônia, e pelo menos 250 planos de desenvolvimento sustentável em nível de municípios, com assistência técnica do IICA (Projeto Áridas, 2008).

Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos de Secas e Plano Estratégico de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido

O Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos de Secas (PAN) foi elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente com ampla participação dos demais ministérios, dos estados, da classe política e da sociedade civil (Brasil, 2004). O PAN, elaborado durante alguns anos, foi lançado em 2004 e procurava integrar ações de vários ministérios para atender às demandas dos estados e da sociedade, sempre de forma participativa. O PAN utilizou uma metodologia inspirada no Projeto Áridas, buscando combinar competência técnica com participação política e da comunidade. De certo modo, o PAN representava um ideal de planejamento participativo com base técnica, mas faltou prioridade política na hora da implementação. Continua sendo um documento importante para o desenvolvimento sustentável do Semiárido.

Mais ou menos na mesma época, o então Ministério da Integração Nacional comandou a elaboração de um plano estratégico de desenvolvimento sustentável do Semiárido – PDSA (Brasil, 2005). O PDSA é um plano abrangente, compreendendo todos, ou quase todos, investimentos em realização ou previstos para ocorrer no espaço do Nordeste semiárido. Ele envolve tanto programas federais como também ações dos estados. Prevê uma estrutura de gestão sob o comando do Ministério da Integração Nacional. As principais ações – sobretudo os grandes projetos estruturantes, como a transposição de águas do Rio São Francisco, a revitalização do São Francisco e a Ferrovia Transnordestina – estão previstas no plano. Contudo, o PDSA não indica novas fontes de financiamento nem articula um processo de gerenciamento instrumentalizado.

Uma análise conjunta do PAN e do PDSA sugere que há atualmente planos bem abrangentes para o Nordeste, mas não há estruturação financeira e de gerenciamento que lhes dê sequência. Em outras palavras, esses planos não estão refletidos numa estratégia de implementação.

Plano de ciência e tecnologia para o Nordeste

Em 2014, o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC), por meio do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), de Brasília, elaborou de forma participativa com todos os estados um plano de ciência, tecnologia e inovação para o desenvolvimento sustentável do Nordeste brasileiro (PCTI-NE). Com base em sugestões de especialistas e tomadores de decisão do Nordeste, foi preparado um capítulo especial sobre o Semiárido, que tinha como objetivo “Transformar o Nordeste em referência mundial na P&D e inovação para a convivência com a seca, combate à desertificação e adaptação às mudanças climáticas” (Brasil, 2014). Esse objetivo deveria ser alcançado com base nas seguintes linhas de ação:

- Produção e Difusão de Conhecimento para o Desenvolvimento Sustentável do Semiárido.
- Promoção da Cooperação Nacional e Internacional para o Intercâmbio de Conhecimentos e Experiências em Pesquisa, Ciência, Tecnologia e Inovação sobre as Terras Secas.
- Adaptação às Mudanças Climáticas nos Biomas do Nordeste (Semiárido, Cerrados, Zona da Mata, Zona Costeira) e Valorização da Bioeconomia.
- Estímulo à Difusão e Disseminação de Novos Conhecimentos e Práticas Inovativas para o Desenvolvimento Sustentável do Semiárido.

O PCTI Nordeste não avançou na alocação de recursos e faz parte da já longa lista de planos e programas para o desenvolvimento do Nordeste e do Semiárido que não são implementados.

Grande projeto: transposição de águas do Rio São Francisco

Embora não sendo um plano de desenvolvimento, mas um programa específico, vale a pena mencionar o Programa de Integração de Bacias do Rio São Francisco (PISF). Apesar dos atrasos e atropelos no seu planejamento e execução, o PISF realiza uma proposta iniciada ainda no século 19, durante o Império. A ideia foi retomada nos anos 1980, no governo da Nova República, mas não se viabilizou de imediato. Trata-se de um projeto que leva água do Rio São Francisco (1,4% da vazão regularizada) para bacias do Nordeste setentrional, especificamente do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco.

O programa prevê 470 km de canais, além de túneis e estações de elevação. Complexo tecnicamente, o problema mais difícil, entretanto, foi de negociação entre a bacia doadora (Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas) e as bacias receptoras. A falta de negociação atrasou o início das ações, que acabou se viabilizando no começo dos anos 2000. Em 2017, o trecho leste, que atende ao estado da Paraíba e Pernambuco, entrou em funcionamento.

Uma questão importante nesse projeto, que deverá atender a um total de 12 milhões de pessoas que vivem no Semiárido, é a forma de gestão do seu funcionamento, que está ainda em discussão (no ano de 2019).

Considerações finais

Como visto neste capítulo, há uma riqueza de instituições, planos, programas e projetos para o desenvolvimento do Semiárido. Foram realizadas outras ações importantes, não relatadas anteriormente, como a interiorização das instituições de ensino acadêmico e técnico e os diversos projetos de irrigação. Estes últimos, depois de longos anos de tentativas, come-

çaram a dar respostas sustentáveis quando se compreendeu que irrigação não é meramente uma questão social, mas, sobretudo, técnica e de capacidade de execução.

O sucesso de alguns polos de irrigação – como é o caso de Petrolina, PE, e Juazeiro, BA –, mostra que, em umas poucas áreas do Nordeste semiárido, é possível pensar em aumento de produtividade e criação de empregos, no momento em que as principais restrições ao desenvolvimento, nomeadamente água e solos, são removidas. Todavia, na região setentrional do Semiárido há um limite baixo para o aumento de produtividade em face das restrições apontadas.

Deve-se salientar que o Semiárido, nas últimas cinco ou seis décadas, passou por grandes transformações. Parte dessas transformações pode ser atribuída ao movimento geral da sociedade e da economia nacional e global. Outra parte pode ser devida à maior presença do Estado, especialmente dos governos subnacionais, e aos planos e programas de desenvolvimento. De uma sociedade mormente rural no início do período de planejamento, na década de 1960, o Semiárido é atualmente uma sociedade sobretudo urbana. Os índices de pobreza melhoraram sensivelmente, assim como os de educação, saúde e proteção social, de habitação, de saneamento. Contudo, há ainda grandes problemas a serem resolvidos para o desenvolvimento sustentável do Semiárido.

Duas questões têm sido importantes e continuam como gargalos à boa implementação dos planos de desenvolvimento:

- A questão institucional, com o enfraquecimento de órgãos de desenvolvimento regional como a Sudene e o DNOCS.
- A questão de recursos financeiros. Algumas das ações mencionadas contaram com recursos durante certo tempo, outras não foram financiadas e, portanto, podem ser consideradas apenas como propostas.

No momento em que este livro está sendo finalizado, uma nova tentativa de planejamento se realiza em favor do Nordeste e do Semiárido: o

Plano Regional de Desenvolvimento do Nordeste (PRDNE). O plano foi elaborado pela Sudene, com o apoio técnico do CGEE, ligado ao MCTIC, com a supervisão do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). Deverá ser aprovado pelo Congresso Nacional e implementado durante os anos de 2020 a 2023. A nova estratégia para o desenvolvimento sustentável do Nordeste, abraçada pelo PRDNE, se organiza em torno do papel da ciência, tecnologia e inovação, como ferramenta para elevar a produtividade, gerar empregos e guiar a inserção do Nordeste na economia do século 21, ao lado das dimensões econômica, social, ambiental e institucional. Uma gama de projetos específicos, identificados pelos governadores dos nove estados (além de parte de Minas Gerais e do Espírito Santo), faz parte do plano, que tem visão de longo prazo, com foco em 2032. O esforço conjunto dos governos federal e estaduais, da iniciativa privada e da sociedade civil é necessário para o enfrentamento dos problemas que ainda ocorrem no Semiárido do Nordeste.

Referências

- ABREU, J. C. de. **Capítulos da história colonial**: 1500-1800. Brasília, DF: Senado Federal, 1998. 226 p.
- BARROS, F. B. S. **Japuara**: um relato das entranhas do conflito. Brasília, DF: MDA, 2013. 224 p. (Coleção Camponeses e o Regime Militar, 2).
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Plano de ciência, tecnologia e inovação para o desenvolvimento sustentável do Nordeste brasileiro**. Brasília, DF, 2014. 164 p. (CGEE. Documentos técnicos, 22).
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Plano estratégico de desenvolvimento sustentável do Semi-Árido-PDSA**: versão para discussão. Brasília, DF, 2005. 134 p. (Documento base, 1).
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Reforma agrária e desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF, 2000. 380 p. Disponível em: <http://www.econometrix.com.br/pdf/53612a1af7df0310cc387841741ba6bde04a64ae.pdf>. Acesso em: 20 set. 2018.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Programa de ação nacional de combate à desertificação e**

- mitigação dos efeitos das secas – PAN Brasil.** Brasília, DF, 2004. 242 p.
- CARVALHO, J. O. de. **Desenvolvimento regional: um problema político.** 2. ed. Campina Grande: EDUEPB, 2014. 351 p.
- IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD.** 2015. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2015/default.shtm>. Acesso em: 2 out. 2018.
- IPEA. **Avaliação de incentivos fiscais.** Brasília, DF, 1985.
- MAGALHÃES, A. R. **Desenvolvimento comunitário e combate à pobreza no Nordeste.** Brasília, DF: Banco Mundial, 2000. 10 p.
- MAGALHÃES, A. R. **Industrialização e desenvolvimento regional: a nova indústria do Nordeste.** Brasília, DF: Iplan, 1983. 315 p. (Estudos para o planejamento, 24).
- MARTINS, E. S. P. R.; MAGALHÃES, A. R. A seca de 2012-2015 no Nordeste e seus impactos. **Parcerias Estratégicas**, v. 20, n. 41, p. 107-128, jul./dez. 2015.
- MARTINS, E. S. P. R.; MAGALHÃES, A. R.; FONTENELE, D. A seca plurianual de 2010-2017 no Nordeste e seus impactos. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 44, jan./jun. 2017.
- MEDEIROS, C. N. de. **Análise da estrutura fundiária da região Nordeste e do estado do Ceará durante o período 1970-2006.** Fortaleza: Ipece, 2010. 19 p.
- MEDICI, E. G. **Discurso no Conselho Deliberativo da Sudene, em 6 de julho de 1970.** Recife: Sudene, 1970.
- MIRANDA, R. N. Avaliação do Projeto Nordeste e do Programa de Apoio ao Pequeno Produtor. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 22, n.1/4, p. 9-45, jan./dez. 1991.
- NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável.** Brasília, DF, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030>. Acesso em: 14 jul. 2018.
- PROJETO ARIDAS (Brasília, DF). **Memória e acervo.** Brasília, DF 2008. 66 p.
- PROJETO ARIDAS (Brasília, DF). **Nordeste: uma estratégia de desenvolvimento sustentável do Nordeste.** Brasília, DF: Ministério do Planejamento e do Orçamento, 1995. 231 p.
- PROJETO ARIDAS (Brasília, DF). **Política de desenvolvimento sustentável para o Nordeste Semi-Árido.** Brasília, DF, 1994.
- QUEIROZ, R. **O Quinze.** Fortaleza: Est. Graphico “Urania”, 1930. 208 p.
- RIBOT, J. C.; MAGALHÃES, A. R.; PANAGIDES, S. S. (ed.). Declaration of Fortaleza - International Conference on Impacts of Climatic Variations and Sustainable Development in Semi-arid Regions (ICID - 1992). In: CLIMATE Variability, Climate Change and Social Vulnerability in the Semi-arid Tropics. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- SILVA, C. M.; SILVA, C. I. da; HRNCIR, M; QUEIROZ, R, T. de; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. **Guia de plantas visitadas por abelhas da Caatinga.** Fortaleza: Fundação Brasil Cidadão, 2012. 191 p.
- SMITH, H. H. **Brazil, the Amazons and the coast.** New York: Charles Scribners’s, 1879. 678 p.
- SUDENE. **Uma política de desenvolvimento econômico para o Nordeste.** Recife, 1959. 94 p.
- TENDLER, J. **New lessons from old projects.** Washington, DC: The World Bank, 1993. 73 p.
- TEÓFILO, R. **A fome.** Fortaleza: Demócrito Rocha, 1890.
- WILHITE, D. A. **Breaking the hydro-illogical cycle: changing the paradigm for drought management.** Lincoln: University of Nebraska, 2012. 5 p. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/33146422.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2018.
- WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future.** Oxford: Oxford University Press, 1987. 383 p.



Semiárido

Fortalecendo o conceito e a perspectiva da sustentabilidade, o livro *Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira* traz, à luz da visão sistêmica, interconectada e interdependente, os fatores, fenômenos e processos que ocorrem no Semiárido brasileiro para desenvolver uma agricultura de baixa emissão de carbono.

Nessa ótica, a pesquisa tem tido um papel importante para promover a sustentabilidade, nas vertentes ambiental, econômica e social, diante dos impactos negativos dos cenários climáticos sobre os ambientes naturais e os sistemas agropecuários.

Entretanto, a partir desse desafio, surgiram novas oportunidades, por meio da integração de ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação, resultando na proposição de tecnologias que promovem a adaptação dos sistemas de produção e contribuem para a segurança alimentar e o controle das emissões dos gases de efeito estufa. Tecnologias e práticas sustentáveis são alternativas imperativas para aumentar o estoque de carbono e reduzir os impactos das mudanças climáticas, aumentando a produtividade dos agroecossistemas no Semiárido.

Esta obra descreve algumas estratégias e práticas agrícolas que podem ser utilizadas como tecnologias de baixa emissão de carbono e contribuem para a construção de agroecossistemas sustentáveis no Semiárido. Além disso, apresenta a análise e os elementos para a proposição de políticas públicas, associadas à necessidade de aumentar a capacidade adaptativa e mitigatória da sociedade e da economia regional diante das mudanças climáticas.

Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento



CGPE 017539