

Metodologia para a caracterização ambiental e genética
de populações de araucária para sua
conservação e uso sustentável



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

DOCUMENTOS 356

Metodologia para a caracterização ambiental e genética de populações de araucária para sua conservação e uso sustentável

*Marcos Silveira Wrege
Márcia Toffani Simão Soares
Valderês Aparecida de Sousa
Elenice Fritzsons
Ananda Virgínia de Aguiar
Itamar Antônio Bognola
João Bosco Vasconcellos Gomes
Patrícia Póvoa de Mattos
Cristiane Vieira Helm
Letícia Penno de Sousa
Andressa Godinho Scarante
Maria de Fátima da Silva Mattos*

Embrapa Florestas

Estrada da Ribeira, km 111, Guaraituba

Caixa Postal 319 Fone/Fax: (41) 3675-5600

83411-000 - Colombo, PR, Brasil

www.embrapa.br/florestas

www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

Comitê Local de Publicações da Embrapa Florestas

Presidente: *Patrícia Póvoa de Mattos*

Vice-Presidente: *José Elidney Pinto Júnior*

Secretária-Executiva: *Elisabete Marques Oaida*

Membros: *Annete Bonnet, Cristiane Aparecida Fioravante Reis, Elenice Fritzsos, Krisle da Silva, Marcelo Francia Arco Verde, Marilice Cordeiro Garrastazu, Susete do Rocio Chiarello Penteado, Valderês Aparecida de Sousa*

Supervisão editorial e revisão de texto: *José Elidney Pinto Júnior*

Normalização bibliográfica: *Francisca Rasche*

Projeto gráfico da coleção: *Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica: *Neide Makiko Furukawa*

Foto capa: *Márcia Toffani Simão Soares*

1ª edição

versão digital (2021)

Todos os direitos reservados

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Florestas

Metodologia para a caracterização ambiental e genética de populações de araucária para sua conservação e uso sustentável. [recurso eletrônico] / Marcos Silveira Wrege ... [et al.]. - Colombo : Embrapa Florestas, 2021.

PDF (23 p.) - (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958 ; 356)

Modo de acesso: World Wide Web:

<<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/item/221>>

1. *Araucaria angustifolia*. 2. Distribuição geográfica. 3. Genética. 4. Solo florestal. 5. Biodiversidade. I. Wrege, Marcos Silveira. II. Soares, Márcia Toffani Simão. III. Sousa, Valderês Aparecida de. IV. Fritzsos, Elenice. V. Aguiar, Ananda Virgínia de. VI. Bognola, Itamar Antônio. VII. Gomes, João Bosco Vasconcelos. VIII. Sousa, Letícia Penno de. IX. Scarante, Andressa Godinho. X. Mattos, Maria de Fátima da Silva. XI. Série.

CDD (21. ed.) 634.9751

Autores

Marcos Silveira Wrege

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Márcia Toffani Simão Soares

Engenheira-agrônoma, doutora em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Valderês Aparecida de Sousa

Engenheira Florestal, doutora em Ciências Florestais, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Elenice Fritzsos

Engenheira-agrônoma, doutora em Engenharia Florestal, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Ananda Virgínia de Aguiar

Engenheira-agrônoma, doutora em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Itamar Antônio Bognola

Engenheiro-agrônomo, doutor em Engenharia Florestal, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR

João Bosco Vasconcellos Gomes

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Patrícia Póvoa de Mattos

Engenheira-agrônoma, doutora em Engenharia Florestal, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Cristiane Vieira Helm

Química Industrial, doutora em Ciências dos Alimentos, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Letícia Penno de Sousa

Engenheira Florestal, doutora em Engenharia Florestal, pesquisadora da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS

Andressa Godinho Scarante

Graduanda em Engenharia Florestal, bolsista PIBIC da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Maria de Fátima da Silva Mattos

Graduanda em Agronomia, bolsista PIBIC da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Apresentação

A araucária (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.) está presente na Floresta Ombrófila Mista, fitofisionomia caracterizada por baixas temperaturas, no Bioma Mata Atlântica. É considerada, pela União Internacional para Conservação da Natureza (IUCN), espécie em perigo de extinção e, conseqüentemente, vulnerável às mudanças climáticas. Tem importância ecológica, econômica, social e cultural, devido ao valor da madeira e de suas sementes, o pinhão. Neste documento, é apresentada uma metodologia multidisciplinar usada para caracterizar o ambiente e o genótipo da araucária e suas interações genótipo x ambiente, com a análise das correlações entre clima, solo, características fenotípicas e genéticas das populações.

A equipe do projeto Araucamate fez expedições a campo em áreas conservadas, entre as quais Florestas Nacionais, Parques Nacionais, entre outros, para levantar os dados necessários em pontos estratégicos, priorizando as zonas de borda da distribuição da espécie. Essas são as primeiras a sentir os efeitos das mudanças climáticas, onde a diversidade genética da espécie é maior e existem populações únicas, endêmicas e mais fragilizadas, situadas em áreas de transição climática, com maior possibilidade de adaptação às condições de clima mais quente.

As informações geradas com a metodologia apresentada neste documento podem também ser úteis para garantir a manutenção da capacidade de conservação e da diversidade genética da espécie, de acordo com os compromissos firmados pelo Brasil na COP21, Conferência do Clima em Paris, onde o país se comprometeu a aumentar a capacidade de conservação de seus recursos genéticos e promover o uso sustentável de sua biodiversidade.

A metodologia desenvolvida na Embrapa Florestas é passível de uso para outras espécies arbóreas nativas. Esperamos com este trabalho estar contribuindo para a conservação genética da araucária e seu uso em sistemas de produção de espécies arbóreas nativas no Brasil.

Erich Gomes Schaitza
Chefe Geral da Embrapa Florestas

Sumário

Introdução.....	9
Metodologia.....	10
Definição das zonas de borda de distribuição da araucária visando o planejamento estratégico para amostragem	11
Amostragem para dendrocronologia e para genotipagem.....	13
Amostragem para dendrocronologia	13
Amostragem para genotipagem	14
Amostragem de solos	15
Caracterização do clima.....	15
Definição de zonas homogêneas	16
Identificação dos nichos ecológicos de grupos populacionais	17
Resultados obtidos	19
Conclusões.....	21
Agradecimentos.....	21
Referências	22

Introdução

A araucária, conhecida também como pinheiro-do-paraná, é considerada espécie em perigo de extinção pela União Internacional para Conservação da Natureza (IUCN, 2016; Sühs et al., 2019), devido à grande exploração da madeira ocorrida principalmente no século XX. Desde então, perdeu mais de 90% da cobertura original da Floresta com Araucária, fitofisionomia conhecida também como Floresta Ombrófila Mista (FOM), um dos mais importantes tipos de vegetação do bioma Mata Atlântica e de elevada vulnerabilidade às mudanças climáticas globais. A FOM ocorre nas regiões de altitude do Sul e do Sudeste do Brasil, em áreas de muito frio. As espécies que as compõem são vulneráveis porque, com o aquecimento global, não têm onde se realocarem e estão sujeitas a maior perda de diversidade, principalmente nas áreas periféricas e de transição climática. A manutenção da cobertura florestal é fundamental para garantir a capacidade de adaptação e de resiliência da espécie às ameaças climáticas, bem como os serviços ecossistêmicos, entre os quais estão relacionadas à segurança hídrica e energética do Sul e do Sudeste do País e o sequestro de carbono da atmosfera. Na FOM, ocorrem as nascentes dos principais rios da região que suprem os reservatórios de água para as cidades, o campo e as hidroelétricas.

A obtenção de resultados que gerem informações para auxiliar no aumento da capacidade de adaptação e de resiliência da espécie às ameaças climáticas e que visem garantir a manutenção de sua diversidade genética é fundamental e atende aos termos do acordo do clima de Paris, 21^a Conferência das Partes (COP21), da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, do qual o Brasil é signatário e no qual se comprometeu a aumentar a capacidade de conservação das espécies nativas e a garantir o uso sustentável dos recursos da biodiversidade dos biomas brasileiros, inclusive os do bioma Mata Atlântica.

No trabalho, foram obtidos resultados que auxiliarão os formuladores de políticas públicas e os tomadores de decisão na criação de leis e normas que colaborem para manter a capacidade de adaptação e de resiliência da araucária às ameaças do clima, como a indicação de áreas de menores riscos climáticos e de grupos de populações com características comuns, que podem facilitar a indicação das melhores zonas para estabelecimento da espécie.

Neste contexto, desenvolvemos uma metodologia para caracterizar o ambiente e a genética de populações naturais de araucária, visando garantir a manutenção ou aumento da capacidade de conservação e do uso sustentável dos recursos genéticos da espécie. O método consiste de cinco etapas: 1) definição das zonas periféricas de distribuição de araucária e seleção de regiões com prioridade para amostragem; 2) amostragem para dendrocronologia e genotipagem; 3) amostragem de solo; 4) caracterização do clima, e 5) identificação dos nichos ecológicos dos grupos populacionais. Atualmente, o presente protocolo está sendo utilizado para estudo de populações situadas na região Sul do Brasil, área de predominância da espécie.

Embora tenha sido desenvolvido para araucária, o método pode ser aplicado, com adaptações, para uso em outras espécies florestais nativas. O método pode servir também para que pesquisadores na área de conservação de recursos genéticos elaborem planos de amostragem de material genético em campo, com uma abordagem multidisciplinar.

Metodologia

No desenvolvimento do método, foram previstas ações multidisciplinares envolvendo diferentes áreas do conhecimento, visando obter informações para garantir o aumento da capacidade de conservação e do uso sustentável dos recursos genéticos da araucária. Para atingir este objetivo, diferentes grupos populacionais da araucária foram caracterizados geneticamente e relacionados ao sítio de ocorrência de cada uma quanto aos atributos pedoclimáticos, analisando o desenvolvimento dos indivíduos no ambiente quanto à capacidade de produção de madeira. A representação esquemática da metodologia é apresentada na Figura 1.

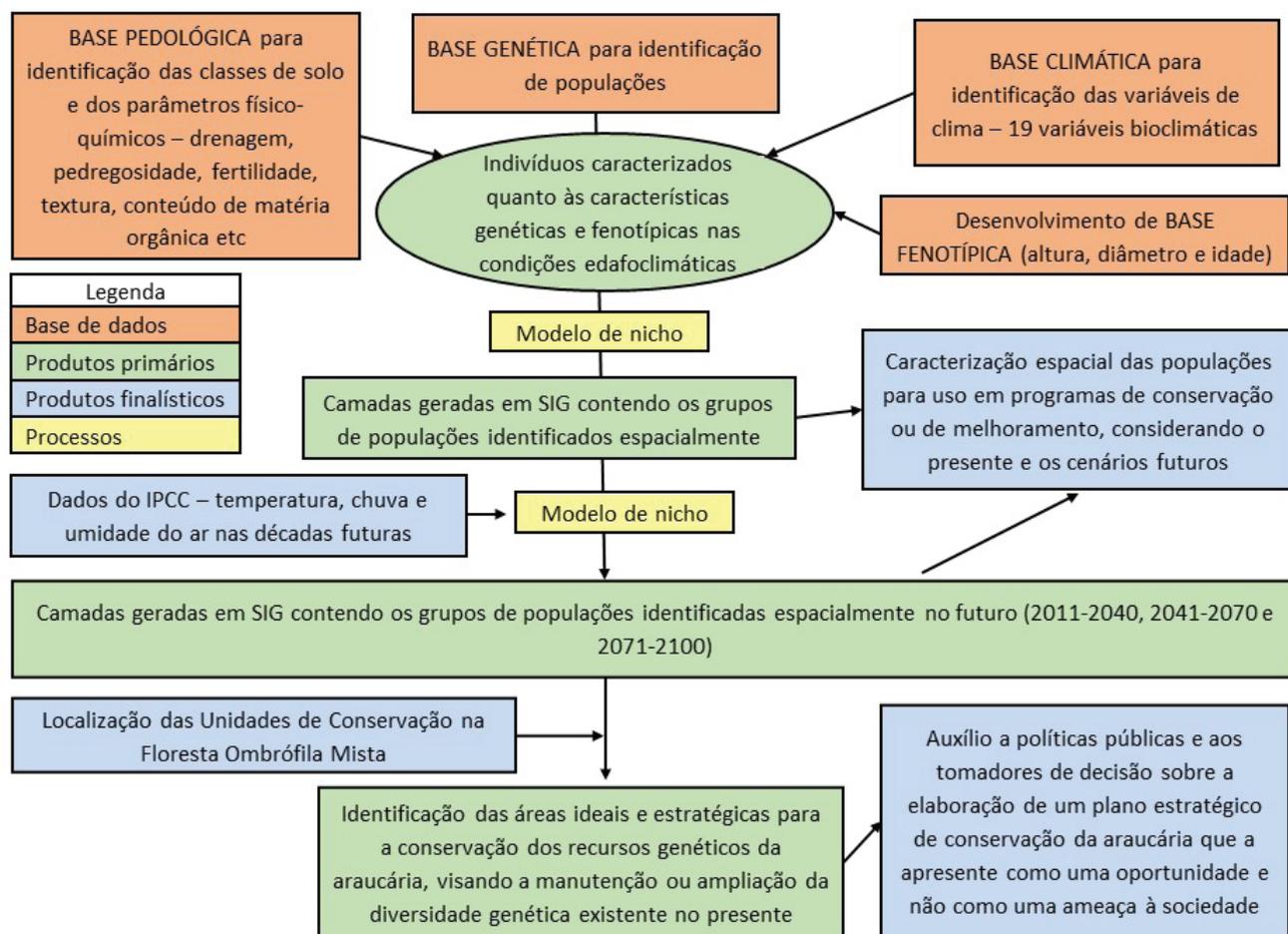


Figura 1. Representação esquemática dos procedimentos metodológicos desenvolvidos para araucária.

Para este fim, foram feitos dois tipos de levantamento, obtendo dados primários e dados secundários levantados na literatura e herbários de acesso público.

No trabalho de campo, foram feitas expedições a algumas regiões estratégicas dentro da região de distribuição natural da espécie, em áreas periféricas e de transição climática, onde algumas árvores foram aleatoriamente selecionadas, amostradas e georreferenciadas, respeitando-se um raio mínimo de 100 m entre as árvores, para evitar a obtenção de amostras com algum grau de parentesco. Paralelamente, os parâmetros pedoclimáticos dos locais de coleta foram levantados.

Entre os atributos pedológicos, obteve-se a classificação do solo e a profundidade, drenagem, pedregosidade, textura e fertilidade do solo. Para cada indivíduo, mediu-se a altura e a circunferência

na altura do peito (CAP). Estas informações, em conjunto com as análises dos anéis de crescimento, serviram para desenvolver modelos de crescimento dos indivíduos nos seus habitats, permitindo caracterizá-los geneticamente em relação ao potencial de produção.

Dados secundários foram compilados e organizados, avaliando sua qualidade e eliminando aqueles com suspeita de erro, por exemplo os discrepantes, com o objetivo de completar os levantamentos de campo e dar uma melhor dimensão espacial às análises. Este processo de validação de dados é necessário, pois os bancos são alimentados por diversas fontes, provenientes de diversos herbários que utilizam metodologias distintas, sendo necessária uma uniformização.

Com o mesmo objetivo, foram utilizados também dados secundários de clima, de solos e de parâmetros genéticos das populações naturais, como testes de procedências e de progênies de araucária obtidos na literatura.

Definição das zonas de borda de distribuição da araucária visando o planejamento estratégico para amostragem

Ao todo, para o desenvolvimento do trabalho, foram feitas cinco expedições a campo e, em cada uma delas, houve uma etapa de planejamento da viagem, por meio de contatos previamente estabelecidos, verificando a possibilidade de acompanhamento de um técnico local, com bom conhecimento da região e das áreas preservadas, com o objetivo de amostrar as áreas com melhor conservação.

As coletas de campo foram feitas priorizando as zonas periféricas de distribuição da espécie, onde a diversidade genética é maior e o risco de extinção de populações mais fragilizadas e menos adaptadas é maior. Devido às diferenças das condições climáticas nas zonas periféricas em relação às zonas predominantes da espécie, existem populações de araucária que são únicas (endêmicas) e ocorrem apenas nestas zonas e, por estarem no limite máximo das condições favoráveis para se desenvolver, o risco de extinção é iminente e pode ser irreversível.

Assim, alguns critérios foram definidos pela equipe, para a seleção das regiões para amostragem, entre os quais priorizar áreas mais preservadas, dentro de Florestas Nacionais (Flonas) ou no entorno, seguindo orientação de seus diretores, ou Parques Nacionais. Nos locais em que não existiam Flonas ou Parques, as áreas melhor preservadas foram indicadas por professores e pesquisadores das universidades locais e institutos de pesquisa, envolvendo também a participação das comunidades locais, geralmente agricultores familiares.

Foram feitas expedições aos seguintes locais: estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais - Parque Nacional do Itatiaia (Figura 2); estado do Rio Grande do Sul - municípios da Serra do Sudeste (Escudo Sul-Riograndense) - Pelotas, Canguçu e Santana da Boa Vista (Figura 3); Flona de São Francisco de Paula (Figura 4); município de Machadinho e região; Flona de Passo Fundo; estado do Paraná - município de Quatro Barras e região.

Os levantamentos feitos nas cinco expedições serviram para aumentar as amostragens que estão sendo feitas para a espécie ao longo das últimas décadas, formando um banco de dados da espécie. Isso requer continuidade, ao longo das próximas décadas, com novas expedições, por exemplo, às regiões sudoeste, oeste e noroeste do estado do Paraná, conhecidas por possuírem características de solo e de clima inigualáveis e de desenvolvimento diferenciado da araucária, assim como os estados de Minas Gerais e Espírito Santo.

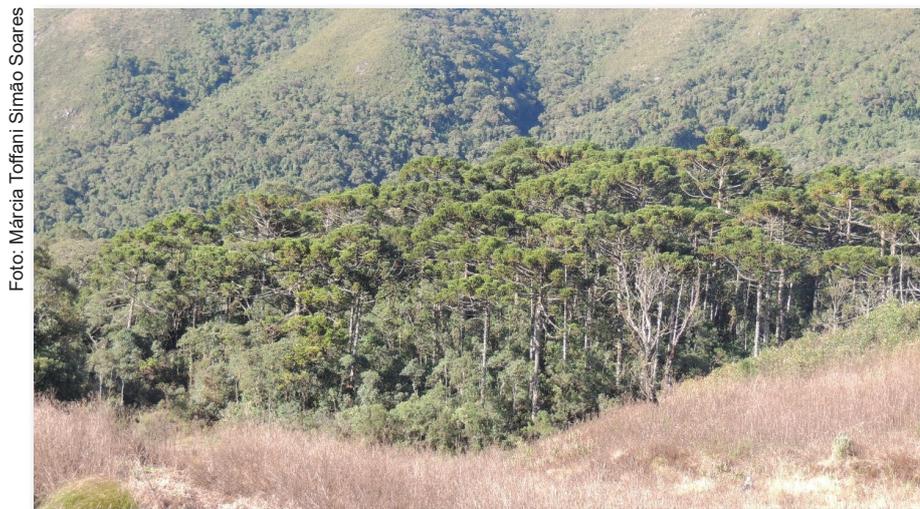


Figura 2. Araucária em altitudes superiores a 1.000 m e tipo de vegetação existente na região que compreende o Parque Nacional do Itatiaia, nos estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais, região norte de ocorrência.



Figura 3. Araucária em altitudes superiores a 200 m, na região do município de Santana da Boa Vista, RS, onde se encontra o limite sul de ocorrência.



Figura 4. Araucária recém-caída, com mais de 500 anos, na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS

Amostragem para dendrocronologia e para genotipagem

Nas regiões selecionadas para as expedições, foram efetuados os trabalhos de campo que consistiram em escolher aleatoriamente indivíduos para a identificação, mensuração e coleta de material biológico. Em cada local visitado, foram amostradas, em média, 30 árvores, respeitando o raio mínimo de 100 m entre indivíduos (Sousa et al., 2005). Foram registradas as coordenadas geográficas dos indivíduos, coletadas amostras de câmbio (casca) das árvores para genotipagem (em laboratório), visando conhecer as características genéticas das populações, e tráfegem do tronco para o estudo dos anéis de crescimento (Figuras 5 e 6).

Fotos: Marcos Silveira Wrege



Figura 5. Extração de amostras não destrutivas de araucária, para identificação de padrões de crescimento das árvores, em função das condições ambientais.

Fotos: Marcos Silveira Wrege



Figura 6. Passo a passo da extração do câmbio de araucária para genotipagem de populações.

Amostragem para dendrocronologia

Existe uma grande carência de informações sobre a dinâmica de crescimento da araucária em diferentes ambientes. A espécie possui anéis anuais distintos de crescimento, delimitados por faixas de traqueídeos com espessamento das paredes. Os anéis de crescimento da araucária são formados em função das diferenças que ocorrem entre as estações do ano, o que permite ajustar um modelo de crescimento em diâmetro, para a espécie nas florestas naturais (Pereira, 2018). Para isso, foram feitos os seguintes procedimentos em campo e em laboratório:

Para cada árvore, foram coletadas duas amostras não destrutivas (bagaetas de 5 mm de diâmetro) de madeira diametralmente opostas, utilizando sonda de incremento Pressler, obtidas à altura do peito (aproximadamente a 1,30 m), no sentido radial, da casca para a medula (Figura 5).

Os locais selecionados para a obtenção das amostras foram também caracterizados quanto aos atributos climáticos e morfológicos dos solos, para fins de classificação e relação do crescimento radial da árvore com o ambiente.

Em laboratório, as amostras foram fixadas em suporte de madeira. Após secagem e polimento, os anéis de crescimento foram marcados e medidos com auxílio de um microscópio estereoscópico e uma mesa de mensuração, com precisão de 0,01 mm. As medidas possibilitaram a identificação de padrões de crescimento das árvores em função das condições ambientais e, com base nisso, foram desenvolvidos modelos para representação do padrão de crescimento da espécie nos diferentes ambientes.

Amostragem para genotipagem

Genotipagem é a técnica que visa conhecer a constituição genética de uma célula, de um organismo ou de um indivíduo. Várias técnicas podem ser usadas para este fim. Uma delas é a de microssatélites. Microssatélites são unidades de repetição de pares de bases de DNA (ADENINA-TIMINA: AT e GUANINA-CITOSINA: GC), utilizadas como marcadores genéticos em estudos de parentesco. Marcadores genéticos, como os de microssatélites, têm sido aplicados em diferentes estudos no ramo florestal. Neste trabalho, foi utilizada a técnica de microssatélites para o conhecimento da constituição genética de populações de araucária (Sousa et al., 2005).

O método tradicional de amostragem para genotipagem de espécies arbóreas, entre as quais a araucária, baseia-se na coleta de folhas e ramos. Entretanto, as amostras são coletadas muitas vezes em árvores altas, com altura superior a 15 m, precisando de mão de obra especializada, trabalho oneroso e de alto risco, podendo ocorrer acidentes de trabalho. Por esta razão, em muitas regiões não existe mão de obra qualificada e a coleta é inviável (Sousa, 2000, 2001; Sousa et al., 2005).

A conservação do material também é um problema, pois o DNA pode se degradar se não for bem armazenado durante as coletas em campo. Algumas técnicas podem ser utilizadas, como o uso do gelo ou de solução de brometo de cetiltrimetilamônio (CTAB) e álcool, entre outras. Contudo, se as coletas forem feitas em pontos distantes, em regiões de difícil acesso, como matas fechadas, o transporte de equipamentos e reagentes torna-se difícil, podendo afetar a qualidade do DNA coletado. Além disso, o envio das amostras para processamento em outras instituições, muitas vezes situadas em outros países, dificulta ainda mais o uso das folhas como fonte de DNA para a genotipagem.

Diante destas dificuldades, foi proposta uma metodologia adaptada para araucária, de extração e armazenamento de material vegetativo, utilizando amostras extraídas do câmbio (Figura 6), para uso em estudos utilizando marcadores moleculares.

A Figura 6 traz o passo a passo da técnica utilizada, desde a eliminação da parte suberosa da casca (parte mais externa e superficial), que não é utilizada para genotipagem e deve ser retirada, até o uso do “vazador de couro” (tipo de formão especial cilíndrico), para extração do câmbio, que é a parte mais interna da casca (Sousa et al., 2005).

A espessura da casca, muitas vezes, pode dificultar a retirada de amostras. Apesar disso, é feita em tempo inferior, se comparado à amostragem de folhas, permitindo amostrar até 100 a 130 indivíduos por dia, dependendo da densidade populacional de árvores, da vegetação do local e de outras amostragens feitas para o mesmo indivíduo. O armazenamento das amostras em campo é feito em tubos com sílica, para posterior diminuição de umidade em laboratório com uso de dessecador, garantindo a conservação do DNA por mais de 150 dias (Sousa et al., 2005).

Amostragem de solos

Amostras de solos (Figura 7) foram coletadas nas profundidades de 0-20 cm; 20-50 cm e 50-100 cm, em local próximo à coleta de cada indivíduo amostrado, sendo feita sua classificação em campo. Em cada expedição, foram coletadas em torno de 90 amostras de solos para a determinação dos atributos pedológicos, entre os quais profundidade, drenagem, pedregosidade, textura, fertilidade, capacidade de armazenamento de água (CAD), quantidade de matéria orgânica e pH. As amostras foram levadas ao laboratório para as análises físicoquímicas.

Fotos: Márcia Toffani Simão Soares



Figura 7. Extração de amostras de solos e classificação em campo.

Paralelamente, foram trabalhados dados secundários, com levantamento dos mapas de solos dos Estados com ocorrência de araucária, compondo uma legenda completa, com todos os atributos importantes para araucária, de acordo com os critérios estipulados em Garrastazu et al. (2009). Em ambiente SIG, a partir do mapa com as classes de solos por Estado, as tabelas de atributos correspondente aos mapas foram exportadas do ArcGIS para o formato texto (dbf), as quais foram trabalhadas em planilha eletrônica, inserindo os dados dos atributos de solos que não haviam no mapa original (profundidade, drenagem, pedregosidade etc.). As legendas dos solos foram elaboradas a partir de informações das cartilhas que acompanhavam os mapas. Na etapa seguinte, a tabela foi importada novamente para o ArcGIS, obtendo-se o mapa de solos com a legenda atualizada contendo os atributos, cada um compondo uma camada, pronta para ser utilizada no mapeamento da distribuição de ocorrência de araucária ou para uso na caracterização dos atributos de solos de cada ponto de ocorrência de araucária.

Com os dados de solos, é possível relacionar os modelos de crescimento em diâmetro, desenvolvidos no item referente à dendrocronologia, com atributos pedológicos.

Caracterização do clima

A importância de analisar as condições climáticas para o desenvolvimento da araucária ocorre em função de poder definir um calendário para plantio, nas melhores condições e nas melhores regiões, onde as variáveis climáticas melhor atendem à necessidade da espécie (Wrege et al., 2016, 2017), além de poder relacionar com os dados de crescimento da espécie.

A caracterização do clima nas regiões em que araucária ocorre foi estabelecida por meio de sistemas de informações geográficas (SIG). Neste ambiente, as camadas de clima elaboradas por Wrege et al. (2011) (Wrege et al., 2016; 2017; 2018a) (escala 1:250.000) foram relacionadas aos pontos georreferenciados de ocorrência de indivíduos da espécie, usando a função do ArcGIS 'Extract values to point', onde, para cada ponto, foi obtido um valor de cada variável climática para cada mês, estação do ano e para o ano na região Sul do País.

As variáveis climáticas relacionadas, referentes ao período 1976-2005, foram a temperatura mínima, mínima absoluta, média, máxima e máxima absoluta; pluviosidade; evapotranspiração potencial e a diferença (P-ETP) entre a precipitação pluvial (P) e a evapotranspiração potencial (ETP). A fonte dos dados primários utilizados que deu origem às camadas das variáveis climáticas referem-se ao IDR (Iapar/Emater), Epagri, Fepagro, 8º Disme/Inmet, ANA, Universidades Federais e Embrapa.

As camadas foram geradas por dois métodos diferentes, dependendo de suas características: 1) “regressão linear múltipla”, no caso das temperaturas e evapotranspiração potencial; ou 2) “krigagem indicatriz”, no caso da precipitação pluvial e do balanço hídrico. No primeiro caso, utilizou-se o modelo numérico do terreno (MNT) (USGS, 1999), que representa a altitude, além de modelos gerados para a latitude e a longitude (escala 1:250.000), seguindo-se metodologia conforme Wrege et al. (2011).

O MNT gerado pelo United States Geological Survey (USGS) foi recortado, adaptado e corrigido por unidade da federação do Brasil por Weber et al. (2004).

As relações existentes entre a temperatura e a altitude (MNT, em metros), a latitude e a longitude (em graus decimais) foram estabelecidas por uma equação de regressão linear múltipla, de acordo com a seguinte expressão matemática:

$$\text{temperatura} = a + b \times (\text{altitude}) + c \times (\text{latitude}) + d \times \text{longitude}$$

Onde: a = constante; b , c e d = coeficientes da altitude, latitude e longitude, respectivamente.

Para a obtenção das camadas das temperaturas, utilizou-se a função calculadora de camadas (“raster calculator”) do programa ArcGIS, onde foi trabalhada a equação de regressão linear apresentada anteriormente. Os coeficientes das equações de regressão foram publicados por Wrege et al. (2011; 2016).

A técnica da “krigagem indicatriz” foi usada para mapear a precipitação pluvial e o balanço hídrico. Usou-se a função “Geoostatistical Analyst” do ArcGIS para elaborar as camadas (escala 1:250.000).

Do mesmo modo que foi feito para os solos, as variáveis de clima podem ser relacionadas aos modelos de crescimento em diâmetro desenvolvidos no item referente à dendrocronologia e, com os dados obtidos no item referente aos solos, relacionar os modelos de crescimento em diâmetro com as variáveis pedoclimáticas (solo + clima) e determinar quais são as melhores condições ambientais para o desenvolvimento de araucária.

Definição de zonas homogêneas

Nesta atividade, com o auxílio de técnicas estatísticas, buscou-se definir o clima onde ocorre a araucária, estabelecendo os limites de parâmetros climáticos das áreas nativas da espécie nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e São Paulo. Os grupos climáticos foram avaliados individualmente para cada estado.

Para realizar o trabalho, foram avaliados os dados provenientes das redes estaduais de estações meteorológicas, analisando separadamente a rede de cada estado e dividindo-as em dois grupos, definidos com base na ocorrência da espécie: 1) grupo em que ocorre naturalmente e 2) grupo em que não ocorre.

Estas zonas foram baseadas nas informações do Zoneamento Ecológico para Plantios Florestais do estado do Paraná e do estado de Santa Catarina (Carpanezzi; Carvalho, 1988). Imagens do Google Earth do entorno e até 1.000 m de cada estação meteorológica foram analisadas como suporte, para verificar a presença de araucária.

Foram utilizados os dados disponíveis em cada Estado, descritos a seguir: temperatura média anual (todas as temperaturas foram apresentadas em °C), temperatura média anual no verão (média dos meses de janeiro, fevereiro e março), temperatura média anual no inverno (junho, julho e agosto); média da precipitação pluvial acumulada no ano (todas as precipitações pluviométricas foram apresentadas em mm), média da precipitação pluvial acumulada no inverno, média da precipitação pluvial acumulada no verão; diferença entre precipitação pluvial e evapotranspiração potencial acumulada no ano, no verão e no inverno (mm); altitude (m) e insolação média anual (h). Os dados utilizados, referentes ao período entre 1976 e 2005, foram publicados por Wrege et al. (2011), provenientes de diversas redes de estações meteorológicas do Sul do Brasil, entre as quais as do IDR (Iapar/Emater), Ciram/Epagri, Deapi, ANA, 8º Disme/Inmet, universidades federais e Embrapa.

Os dados das estações meteorológicas dos grupos com e sem araucária foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos à análise estatística descritiva, para identificar os valores médios, máximos e mínimos destes grupos. Foi aplicado o teste de Student para verificar quais variáveis climáticas foram significativamente diferentes entre os valores médios dos grupos com e sem araucária e o teste Mann-Whitney de comparação entre medianas.

As áreas onde a araucária está presente foram separadas pela análise de cluster, utilizando os dados das estações meteorológicas destes municípios.

AANOVA (one way) foi aplicada para a diferenciação dos subgrupos que se formaram na análise de cluster e os gráficos de distribuição de frequência auxiliaram na visualização das diferenças.

Estes estudos, feitos separadamente para os estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e São Paulo, constam em Fritzsons et al. (2017, 2018a, 2018b).

Identificação dos nichos ecológicos de grupos populacionais

A modelagem de nicho ou modelagem de distribuição (potencial) de espécies trabalha com dados de distribuição geográfica de espécies (latitude e longitude), e com camadas ambientais, como variáveis de clima, atributos de solos e elementos da paisagem (como relevo, topografia etc.), compondo um sistema matemático de previsão de distribuição geográfica de espécies.

Predição mais precisa requer um conjunto de pontos georreferenciados de qualidade, com certeza da presença da espécie. As camadas ambientais precisam corresponder às regiões onde a espécie ocorre. Quanto mais detalhada for a escala das camadas, melhor poderá ser a representação dos resultados contendo as predições de ocorrência da espécie.

O formato de entrada dos dados nos programas atualmente disponíveis de modelagem de nicho é do tipo texto. Os dados ambientais de entrada mais comuns são de variáveis contínuas de clima e de relevo, mas dados categóricos de solos também podem ser usados. Todas as camadas devem ter as mesmas características de dimensão, de escala e de projeção.

Nesta atividade, a predição de ocorrência de araucária foi feita utilizando dois modelos de algoritmos: *Bioclim* e *Niche Mosaic*. Esses modelos foram selecionados por representarem melhor as

condições naturais de ocorrência da espécie. Para cada espécie, há um modelo correspondente que gera o melhor resultado, com menor erro de previsão de ocorrência.

As zonas periféricas da região de distribuição de araucária foram delimitadas, baseando-se nos elementos de paisagem (relevo e altitude) e nas variáveis de clima. O efeito das mudanças climáticas foi testado sobre as zonas de ocorrência da espécie, utilizando dados climáticos do Sul do País (Wrege et al., 2011) e das demais regiões de ocorrência de araucária. Para os cenários futuros, foram utilizados modelos climáticos do Eta RCM (modelo climático regional), o HadGEM2-ES, que engloba toda a América do Sul, América Central e Caribe, cujos cenários futuros foram preditos de acordo com o proposto no Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (AR5/IPCC). As adaptações regionais para o modelo do Eta foram feitas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Chou et al., 2014).

Foram calculadas as áreas onde atualmente a araucária se distribui naturalmente, usando dois modelos matemáticos (algoritmos) diferentes. As áreas dos cenários futuros também foram calculadas, em metros quadrados, além da porcentagem de sua redução.

Os programas usados foram o Open Modeller (Muñoz et al., 2011) e o ArcGIS 10.1. O primeiro é um programa de modelagem de nicho ecológico, de acesso público. O segundo é um software proprietário de sistema de informações geográficas (SIG), que trabalha com operações e edições de camadas e indica escala, posição do Norte, sistema de projeção, cálculo de áreas e permite elaborar legenda com a classificação de zonas. Mapas de referência para grupos populacionais de araucária contendo sua localização foram elaborados.

Desse modo, os dados do crescimento radial da espécie puderam ser correlacionados às variáveis climáticas e aos atributos dos solos. Assim, as condições foram criadas para a seleção de indivíduos com características genéticas superiores de produção e para a escolha das melhores regiões para estabelecimento, onde as condições pedoclimáticas podem ser mais favoráveis para o desenvolvimento.

Resultados obtidos

A caracterização das zonas de distribuição de araucária quanto às variáveis de clima, aos atributos de solos e ao material genético é fundamental para o desenvolvimento da cultura da araucária no País, demandando, para este fim, uma metodologia multidisciplinar. Assim, pode-se conhecer o desenvolvimento de um conjunto de indivíduos com características comuns - grupos de populações - por região, em função das condições ambientais (solo e clima). Com este intuito, foram feitas expedições a cinco locais, priorizando as zonas periféricas da distribuição da espécie, a fim de se conhecer as condições pedoclimáticas que limitam sua ocorrência e obter amostras de populações com maior diversidade genética. Estas zonas têm maior riqueza de material genético e são compostas por populações únicas, endêmicas, pelo fato de ocorrerem condições ambientais diferentes, existentes apenas nas zonas de transição. As populações, nestas zonas, estão sujeitas a um risco maior de “desaparecimento” (extinção), por estarem situadas na zona periférica de distribuição da espécie. Portanto, são zonas que devem ser priorizadas para a amostragem de indivíduos e caracterização do ambiente, que podem deixar de existir por causa das mudanças climáticas globais e das ações antrópicas. As ações antrópicas têm sido responsáveis pela maior fragmentação das florestas e pela redução do tamanho dos fragmentos, cada vez menores. Há necessidade de trabalhos multidisciplinares voltados às espécies nativas e ao meio em que vivem, com maior nível de detalhe, unindo diferentes áreas do conhecimento na convergência de esforços para constituir um completo banco de dados.

Esta metodologia pode ser empregada inteiramente ou em partes, com adaptações, para a maioria das espécies florestais brasileiras. O trabalho contém informações estratégicas tanto para os profissionais que trabalham com a conservação dos recursos genéticos de espécies nativas, como para aqueles que desenvolvem os programas de melhoramento genético.

O Brasil se comprometeu em aumentar a capacidade de conservação da diversidade genética e fazer o uso sustentável de suas espécies nativas no Acordo do Clima, em 2015. Em atenção a este compromisso, a metodologia desenvolvida teve como finalidade gerar subsídios que proporcionassem o aumento da capacidade de conservação e o uso sustentável da diversidade genética de grupos populacionais de araucária no País.

A metodologia apresenta cinco passos envolvendo diferentes áreas do conhecimento para o alcance do objetivo, que se constitui em caracterizar, sob os aspectos ambientais e genéticos grupos de populações com características comuns de araucária, contribuindo para garantir o aumento da capacidade de conservação e o uso sustentável dos recursos genéticos, de acordo com o compromisso firmado pelo Brasil no acordo de Paris, em 2015, na 21ª Conferência das Partes (COP21).

Os resultados obtidos relacionam-se com diversas áreas do conhecimento, podendo se aperfeiçoar a partir do conhecimento adquirido:

Melhoramento genético - os programas de melhoramento genético de araucária podem ser aperfeiçoados por meio do mapeamento de grupos populacionais e da caracterização de seus sítios, estratégico para o uso do germoplasma da espécie. O conhecimento das condições ambientais e genéticas das populações permitem identificar, em campo, os melhores grupos de populações para uso nos programas de melhoramento genético da espécie. Indivíduos com diferentes características fenotípicas (pinhão ou madeira) podem ser caracterizados e selecionados para uso em programas de melhoramento ou diretamente em plantios comerciais mais produtivos.

Conservação dos recursos genéticos - a identificação de populações com maior divergência genética poderá contribuir efetivamente para a conservação e o uso sustentável dos recursos genéticos de araucária, reduzir a perda de diversidade genética e, assim, reduzir o risco de extinção de algumas populações (ou procedências) menos adaptadas, principalmente aquelas situadas nas zonas periféricas de distribuição da espécie, tais como aquelas do extremo sul do Rio Grande do Sul, onde o ambiente é diferente dos demais, e outras populações encontradas em fragmentos mais ao norte da região de ocorrência, que apresentam características diferentes. As populações nas zonas periféricas são as que têm maior diversidade genética. A garantia de manutenção desta diversidade é importante também para assegurar recursos renováveis para a geração de novos produtos derivados da madeira que poderão futuramente ser desenvolvidos.

Para a conservação das populações naturais de araucária, os reflorestamentos ou os plantios em bancos de germoplasma devem ser feitos em ambientes os mais semelhantes possível aos de onde foram feitas as coletas de sementes, para conservar os genes adaptados ao ambiente específico onde a população se desenvolveu, evitando com isso a exogamia, que é o cruzamento de indivíduos provenientes de populações de outros locais com as populações do local.

O método desenvolvido serve de base para que profissionais na área de conservação de recursos genéticos elaborem planos de amostragem de material genético em campo, com uma abordagem multidisciplinar.

Políticas públicas - Com os dados levantados nas expedições a campo, foi possível mapear a zona de distribuição de araucária e elaborar cenários futuros, analisando o que poderá ocorrer quanto à distribuição da espécie em relação às mudanças climáticas globais. Assim, os formuladores de políticas públicas e os tomadores de decisão terão informações geoespaciais que darão suporte à tomada de decisão para a criação de leis e normas sobre novas áreas a serem protegidas ou garantir as existentes, visando a conservação dos recursos genéticos da espécie.

Zoneamento de riscos climáticos - a caracterização dos genes e do ambiente dos grupos de populações de araucária colabora para a definição de critérios e classes de aptidão ou de riscos de atributos pedoclimáticos, que identifiquem as regiões com os menores riscos climáticos para plantio comercial ou não comercial da araucária, com a finalidade de produção de madeira ou a produção de pinhão, ou para constituição de reserva legal, banco de germoplasma etc.

Modelos de distribuição de espécie - com o desenvolvimento dos modelos de distribuição de araucária em nível de grupos de populações, pode-se identificar as regiões com maior potencial de uso da espécie em reflorestamento, visando a produção comercial, ou a indicação de regiões para composição em plantios destinados à reserva legal, em atendimento ao código florestal. As áreas com maior risco de perda de populações e redução da diversidade genética da espécie, em função das ações antrópicas e das mudanças climáticas globais, também foram identificadas e, assim, podem ser sugeridas ações de mitigação dos impactos causados pelas ameaças climáticas, incluindo a criação de novas unidades de conservação e expansão ou manutenção das existentes, de acordo com o Código Florestal Brasileiro (Brasil, 2012).

Conclusões

A metodologia multidisciplinar desenvolvida é passível de uso para outras espécies florestais nativas e pode contribuir na formação de bancos de dados sobre estas espécies, os quais podem aumentar o conhecimento e gerar subsídios para o aumento de produtividade.

O uso da metodologia desenvolvida, ao indicar grupos de populações ou de regiões estratégicas com características comuns, pode auxiliar no desenvolvimento de programas de conservação ou melhoramento genético de araucária mais eficientes, com o mapeamento das populações e descrição de suas características genéticas, solo e clima.

Com o objetivo de garantir a capacidade de adaptação e resiliência da araucária às ameaças climáticas e às ações antrópicas, o uso da metodologia pode dar suporte à seleção de áreas para criação de novas unidades de conservação e manutenção ou expansão das existentes, para a conservação dos recursos genéticos da espécie.

Com os resultados obtidos, existem condições para a elaboração de um zoneamento de riscos climáticos para a araucária, que indique áreas de menor risco para o estabelecimento dos plantios, com a possibilidade de que os agentes financeiros venham a se interessar por financiá-los, incentivando a conservação pelo uso.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio dado pelos coordenadores das Florestas e Parques Nacionais visitados, onde obteve-se apoio para o desenvolvimento das ações previstas no projeto Araucamate, especialmente ao Sr. Adão da Costa Gülich, diretor da Flona de Passo Fundo (RS), pelo auxílio aos trabalhos desenvolvidos na Flona que coordena e pela viabilização de novos contatos com outras Flonas; Sra. Edenice Brandão de Ávila, diretora da Flona de São Francisco de Paula (RS); Sr. Léo Nascimento, diretor do Parque Nacional do Itatiaia (RJ); aos funcionários da Embrapa Florestas, Sr. Jacir Faber e Sr. Moacir Taverna (in memoriam), pelos auxílios nos trabalhos de campo; à equipe do Laboratório de Genética, da Xiloteca e do Laboratório de Solos e Ciclos Biogeoquímicos da Embrapa Florestas e à Embrapa, pelo financiamento do Projeto Araucamate e apoio logístico.

Referências

- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa [...] e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 102, 28 maio, 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651compilado.htm. Acesso em: 11 nov. 2020.
- CARPANEZZI, A. A.; PEREIRA, J. C. D.; CARVALHO, P. E. R.; REIS, A.; VIEIRA, A. R. R.; ROTTA, E.; STURION, J. A.; RAUEN, M. J.; SILVEIRA, R. A. **Zoneamento ecológico para plantios florestais no Estado de Santa Catarina**. Curitiba: EMBRAPA-CNPq, 1988. 113 p.
- CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, D.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the eta simulation nested in three global climate change models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 438-454, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>.
- FRITZSONS, E.; WREGE, M. S. **A distribuição natural do pinheiro-do-Paraná no Sul e Sudeste do Brasil: a influência de fatores climáticos**. Colombo: Embrapa Florestas, 2017. 32 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 306). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1076562>.
- FRITZSONS, E.; WREGE, M. S.; MANTOVANI, L. E. A distribuição natural do pinheiro-do-Paraná no estado do Rio Grande do Sul, Brasil: a influência de fatores climáticos e geomorfológicos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 117-132, 2018a.
- FRITZSONS, E.; WREGE, M. S.; MANTOVANI, L. E. Climatic aspects related to the distribution of Brazilian Pine in the State of Santa Catarina. **Floresta**, v. 48, p. 503-512, 2018b. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v48i4.53272>.
- FRITZSONS, E.; WREGE, M. S.; MANTOVANI, L. E. Fatores climáticos limitantes para a distribuição natural da *angustifolia* no estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, p. 663-672, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n116.07>.
- GARRASTAZU, M. C.; FLORES, C. A.; WREGE, M. S.; ALBA, J. M. F. Zoneamento edafoclimático para o eucalipto na região do Corede Sul - RS. In: FLORES, C. A.; ALBA, J. M. F.; WREGE, M. S. (org.). **Zoneamento agroclimático do eucalipto para o Estado do Rio Grande do Sul e edafoclimático na Região do Corede Sul - RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009, v. 1, p. 69-78.
- IUCN. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. **The IUCN Red List of Threatened Species**. Version 2016-3. Disponível em: www.iucnredlist.org. Acesso em: 18 fev 2017.
- MUÑOZ, M. E. S.; GIOVANNI, R.; SIQUEIRA, M. F.; SUTTON, T.; BREWER, P.; PEREIRA, R. S.; CANHOS, D. A. L.; CANHOS, V. P. OpenModeller: a generic approach to species' potential distribution modelling. **Geoinformatica**, v. 15, p. 111-135, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10707-009-0090-7>.
- PEREIRA, G. de A. **Dendroclimatologia in seasonally dry tropical forests in the São Francisco Basin, Brazil**. 2018. 70 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- SOUSA, V. A. ; SEBBENN, A. M.; HATTEMER, H.; ZIEHE, M. Correlated mating in populations of a dioecious Brazilian conifer, *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. **Forest Genet**, v. 12, p. 107-119, 2005.
- SOUSA, V. A. **Population genetic studies in *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze**. 2001. 161 f. Thesis (PhD) – Faculty of Forest Sciences and Forest Ecology, Institute of Forest Genetics and Forest Tree Breeding, Georg-August University of Göttingen, Göttingen.
- SOUSA, V. A. Population genetic studies in *Araucaria angustifolia* in southern Brazil. **Heredity**, n. 99, p. 580-591, 2000.
- SÜHS, R. B.; HOELTGEBAUM, M. P.; NUERNBERG-SILVA, A.; FIASCHI, P.; NECKEL-OLIVEIRA, S.; PERONI, N. Species diversity, community structure and ecological traits of trees in an upper montane forest, southern Brazil. **Acta Botanica Brasílica**, v. 33, n. 1, p. 153-162, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-33062018abb0250>.
- UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. Ad Hoc Working Group on the Durban Platform for Enhanced Action. **ADP 2-12 Previously published on draft agreement and draft decision on workstreams 1 and 2**. Disponível em: <https://unfccc.int/process/conferences/pastconferences/paris-climate-change-conference-november-2015/adp-2-12/adp-2-12-previously-published-documents>. Acesso em: 25 out. 2021.
- USGS. U. S. Geological Survey. Survey National Mapping Division. **Global 30 arc second elevation data**. 1999. Disponível em: <http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/gtopo30/gtopo30.html>. Acesso em: 10 jul. 1999.

- WEBER, E; HASENACK, H.; FERREIRA, C. J. **Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação**. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia, 2004. Disponível em: <http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>. Acesso em: 17 jul. 2008.
- WREGE, M. S.; FRITZSONS, E.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; RADIN, B.; STEINMETZ, S.; REISSER JUNIOR, C. Regiões com similaridade de comportamento hídrico no Sul do Brasil. **Revista Ra'e Ga: Espaço Geográfico em Análise**, v. 38, p. 365-384, 2016.
- WREGE, M. S.; FRITZSONS, E.; SOARES, M. T. S.; BOGNOLA, I. A.; SOUSA, V. A.; SOUSA, L. P. DE; GOMES, J. B. V.; AGUIAR, A. V.; GOMES, G. C.; MATOS, M. de F. da S.; SCARANTE, A. G.; FERRER, R. Distribuição natural e habitat da araucária frente às mudanças climáticas globais. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 37, p. 331-346, 2017a. DOI: <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.91.1413>.
- WREGE, M. S.; FRITZSONS, E.; SOARES, M. T. S.; PANTANO, A. P.; STEINMETZ, S.; CARAMORI, P. H.; RADIN, B.; PANDOLFO, C. Risco de ocorrência de geada na região Centro-Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 524-553, 2018a.
- WREGE, M. S.; GARRASTAZU, M.C.; SOARES, M. T. S.; FRITZSONS, E.; SOUSA, V. A.; AGUIAR, A. V. Distribuição das principais fitofisionomias existentes no estado do Paraná e os novos cenários definidos pelas mudanças climáticas globais. **Ambiência**, v. 13, p. 600-615, 2017b.
- WREGE, M. S.; REISSER JÚNIOR, C.; STEINMETZ, S.; RADIN, B.; FRITZSONS, E. Risco de déficit hídrico para espécies florestais e frutíferas no Rio Grande do Sul. **Revista Ra'e Ga: Espaço Geográfico em Análise**, v. 44, p. 55-68, 2018b.
- WREGE, M. S.; SOUSA, V. A.; FRITZSONS, E.; SOARES, M. T. S.; AGUIAR, A. V. Predicting current and future geographical distribution of Araucaria niche modeling. **Environmental and Ecology Research**, v. 4, p. 269-279, 2016.
- WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JUNIOR, C.; ALMEIDA, I. R. **Atlas climático da região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 336 p.

Embrapa

Florestas

