

# 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 km<sup>2</sup> (Silva et al., 2010) para 1.128.697 km<sup>2</sup> (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 (CO<sub>2</sub>) 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.

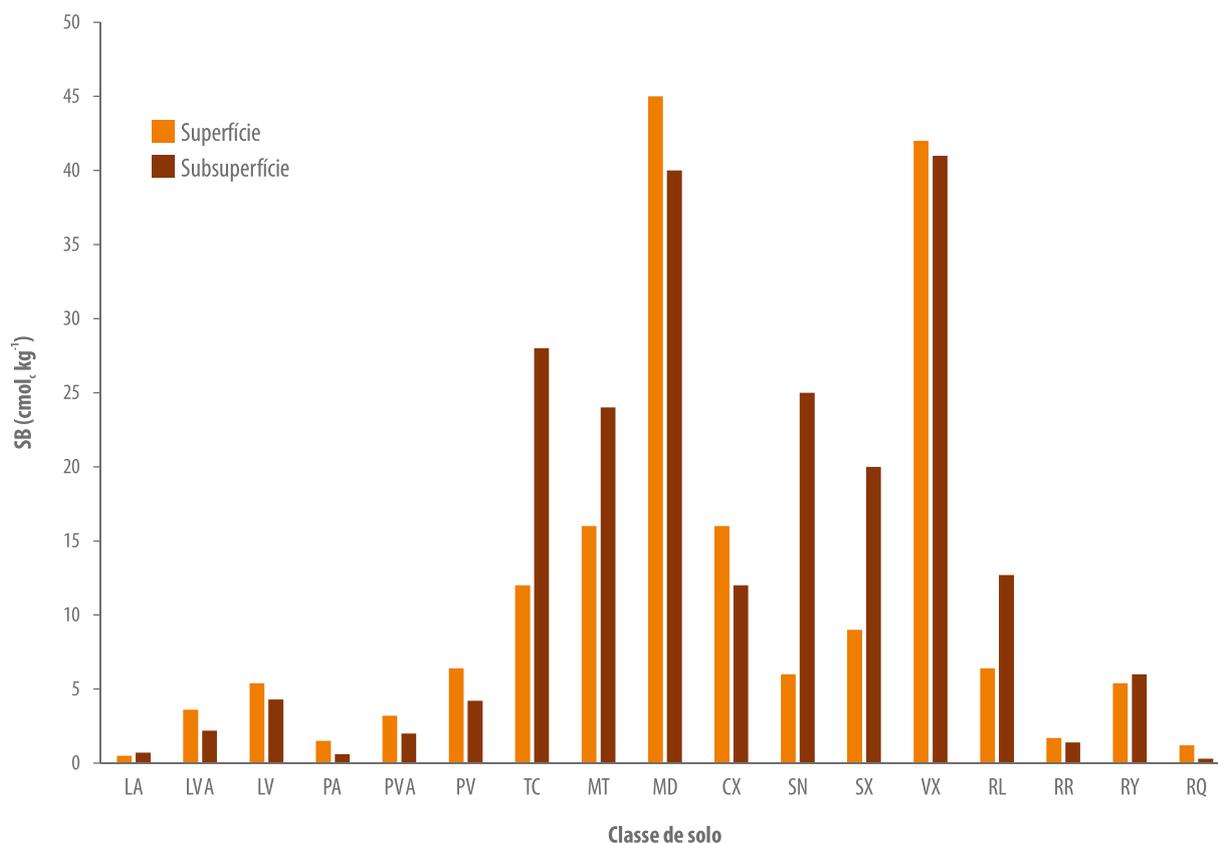
## Características gerais dos solos

Em razão das elevadas taxas de evapotranspiração potencial e das baixas precipitações pluviárias, as perdas de cátions básicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) 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 CO<sub>2</sub>, 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 ( $\leq 50$  cm) e pouco profundos ( $> 50$  cm e  $\leq 100$  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

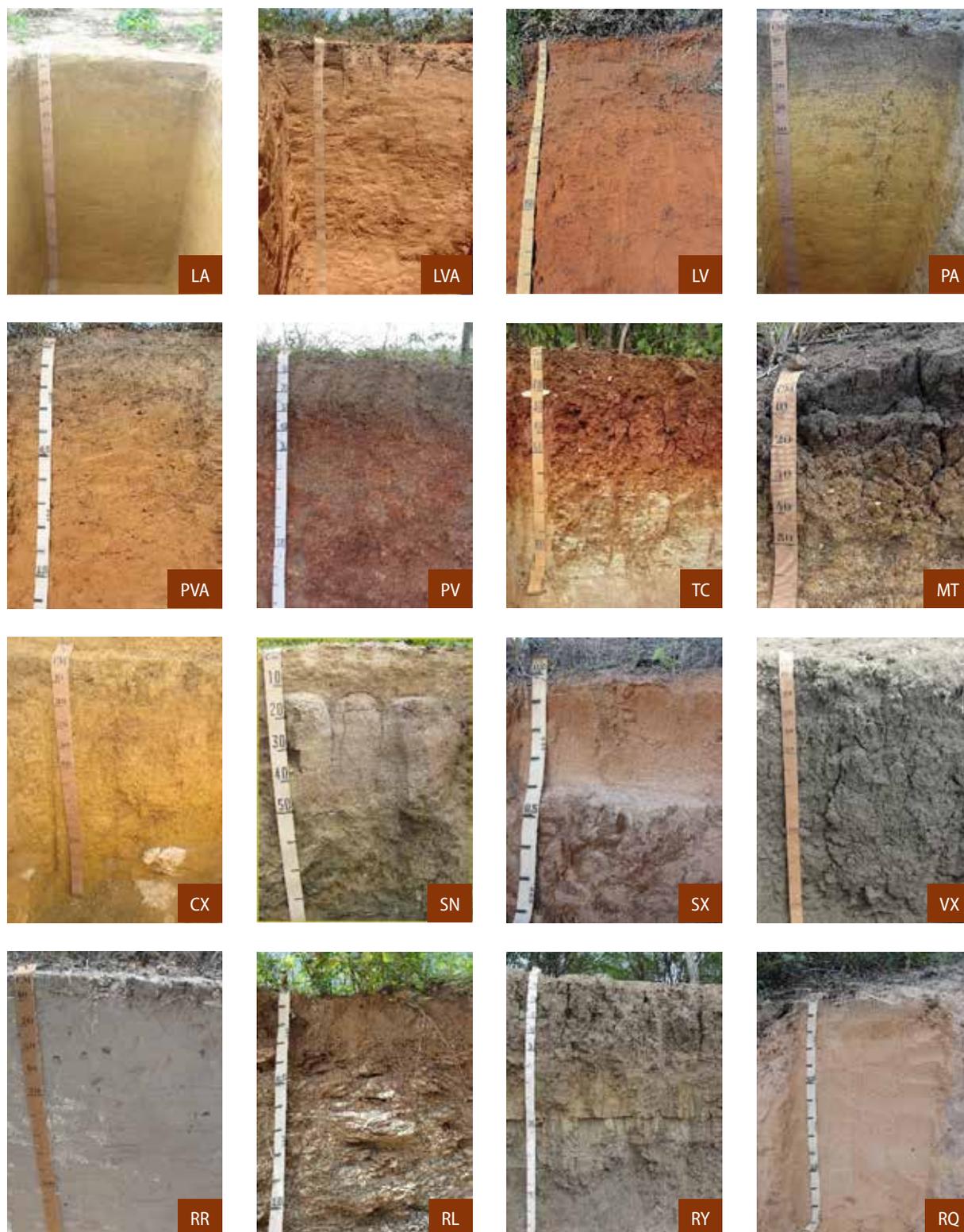


Foto TC: Flavio Adriano Marques. Foto SN: Mateus Rosas Ribeiro (in memoriam). Demais fotos: José Coelho de Araújo Filho

**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.

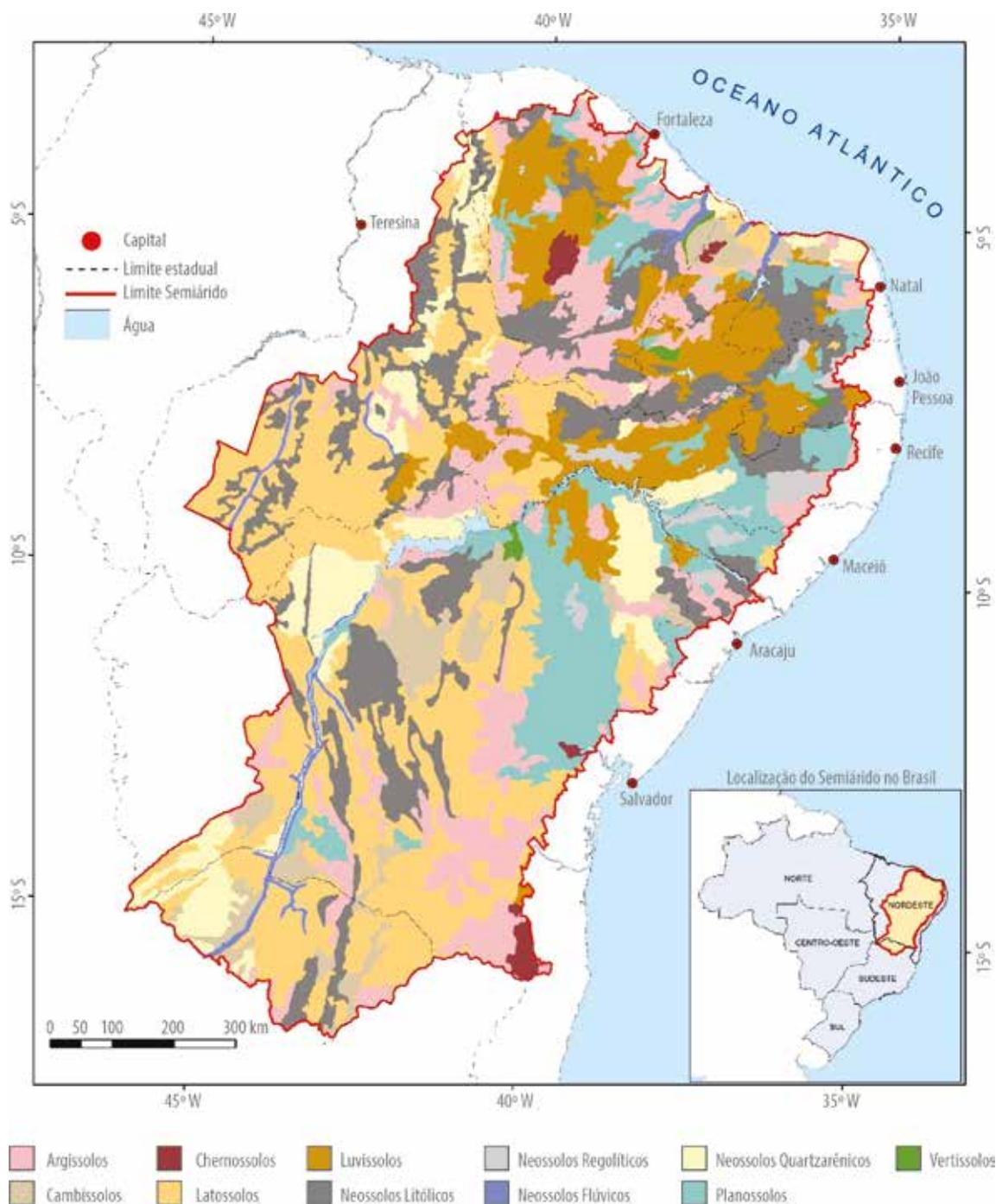
**Argissolos** – São solos minerais, não hidromórficos, com horizonte subsuperficial B textural, tipicamente de acúmulo de argila, predominantemente com argila de atividade baixa. Nos casos em que apresentam argila com atividade alta, estes são distróficos (Santos et al., 2018). Desenvolvem-se a partir 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  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , 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 (esmetctitas), 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<sup>-2</sup>, na camada de 0–30 cm de profundidade do solo;

$Ds_i$  = densidade do solo, em g cm<sup>-3</sup> da camada  $i$ ;

$Li$  = espessura, em dm, da camada  $i$ ;

$CO$  = teor de carbono orgânico, em dag kg<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> a 680 g kg<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> para massa de CO por unidade de área (kg m<sup>-2</sup>). 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<sup>-3</sup>;

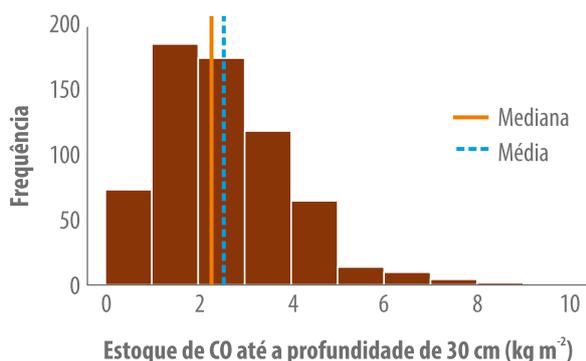
$\text{argila}$  = argila total em g kg<sup>-1</sup>;

$CO$  = carbono orgânico em g kg<sup>-1</sup>;

$SB$  = soma de bases trocáveis em cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>.

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

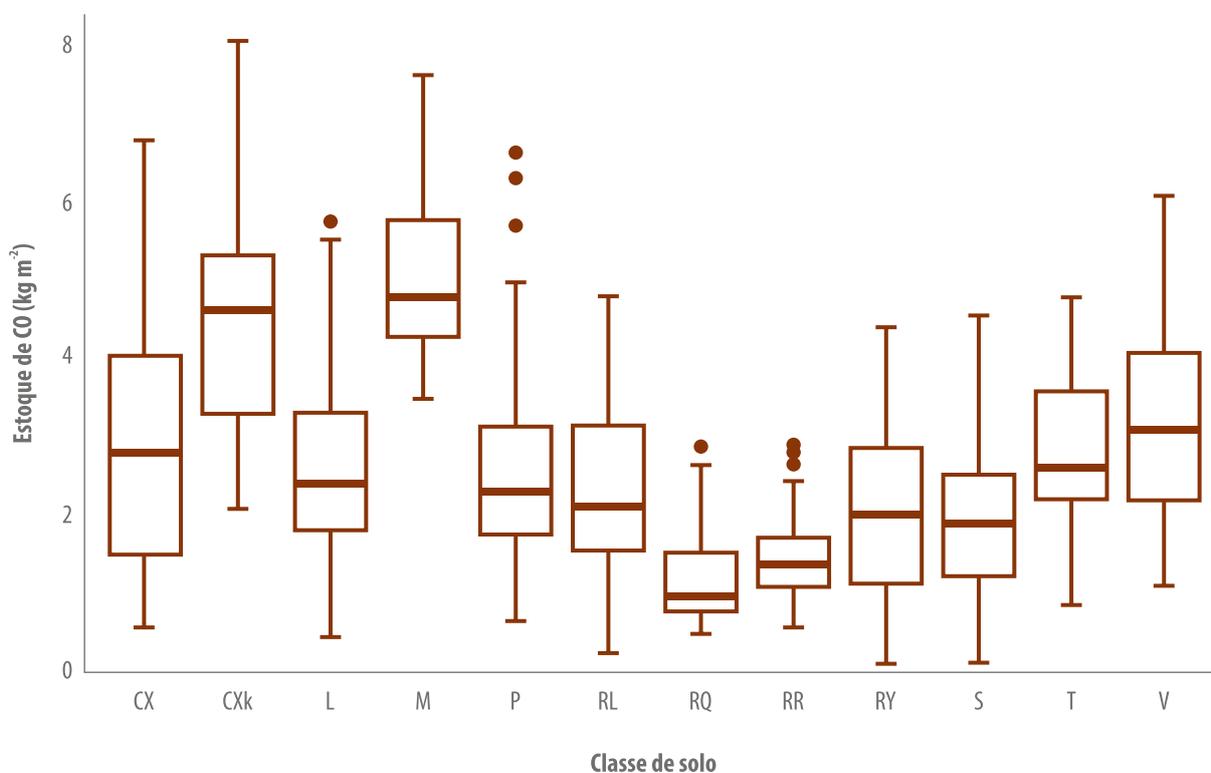


**Figura 4.** Histograma do estoque de carbono orgânico (CO) até a profundidade de 30 cm ( $E_{CO30}$ ) de 649 perfis de solos do Semiárido brasileiro.

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 ( $\text{kg m}^{-2}$ ) até 30 cm de profundidade em solos do Semiárido brasileiro.

Classe de solo <sup>(1)</sup>	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

<sup>(1)</sup>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:

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

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;

$Ai$  = 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 CO<sub>2</sub> 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  $3 \text{ kg m}^{-2}$ . 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:

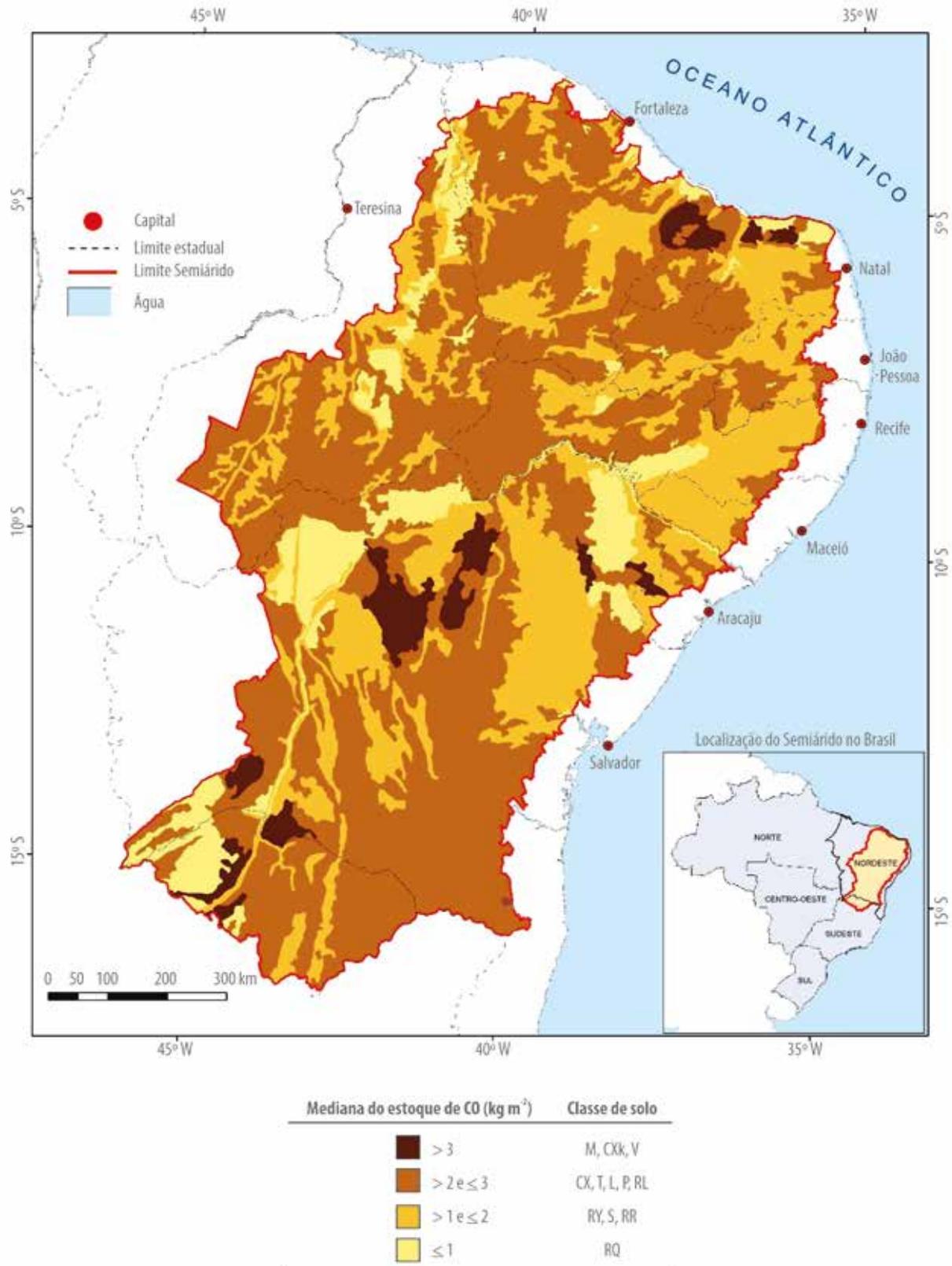
**Grupo 1** – Compreende Chernossolos (M), Cambissolos Háplicos Carbonáticos (CXk) e Vertissolos (V), que apresentam os maiores valores de mediana de  $E_{CO30}$  ( $> 3 \text{ kg m}^{-2}$ ). Não obstante, ocupam uma área conjunta relativamente pequena da região semiárida, cerca de 5,4% (53.179 km<sup>2</sup>). 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<sup>-2</sup> para *Chernozems*, 4,5 kg m<sup>-2</sup> para *Vertisols* e 3 kg m<sup>-2</sup> para *Cambisols Calcic* (Batjes, 1996). Esses valores são relativamente superiores aos estimados neste trabalho para Chernossolos (4,81 kg m<sup>-2</sup>) e Vertissolos (3,07 kg m<sup>-2</sup>), porém inferior ao estimado para os Cambissolos Háplicos Carbonáticos (4,60 kg m<sup>-2</sup>) 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 km<sup>2</sup>) 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 km<sup>2</sup>) 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 <sup>(1)</sup>	CX	CXk	L	M	P	RL	RQ	RR	RY	S	T
CXk	<b>0,027</b>										
L	1,000	<b>&lt;0,001</b>									
M	<b>0,002</b>	0,994	<b>&lt;0,001</b>								
P	0,992	<b>&lt;0,001</b>	1,000	<b>&lt;0,001</b>							
RL	0,891	<b>&lt;0,001</b>	0,992	<b>&lt;0,001</b>	0,999						
RQ	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>					
RR	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,036</b>	0,997				
RY	0,224	<b>&lt;0,001</b>	0,411	<b>&lt;0,001</b>	0,543	0,996	<b>0,043</b>	0,482			
S	<b>0,035</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,049</b>	<b>&lt;0,001</b>	0,064	0,934	<b>0,020</b>	0,431	1,000		
T	1,000	<b>0,017</b>	0,949	<b>&lt;0,001</b>	0,651	0,442	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,017</b>	<b>&lt;0,001</b>	
V	0,986	0,423	0,513	0,053	0,204	0,126	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,003</b>	<b>&lt;0,001</b>	0,996

<sup>(1)</sup> 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<sup>-1</sup> 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<sub>CO30</sub> com valores de mediana ≤ 1 kg m<sup>-2</sup>. As maiores ocorrências estão localizadas nos estados da Bahia, Pernambuco, Ceará e norte de Minas Gerais (Figura 6) e abrangem 8,4% (82.541 km<sup>2</sup>) do Semiárido. São solos essencialmente arenoquartzosos, pobres em CO (teor < 0,3 dag kg<sup>-1</sup> 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  $53.179 \text{ km}^2$  (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  $704.518 \text{ km}^2$  (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  $142.325 \text{ km}^2$  (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  $82.541 \text{ km}^2$  (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](http://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).