

Informe Técnico-Científico de Estudos Hidrológicos e Hidrogeológicos

V. 1, N. 1 Rio de Janeiro, 2024

Mineralogia, estrutura e comportamento físico-hídrico de Latossolos brasileiros e comparação com solos de regiões temperadas

Mineralogy, structure and physico-hydraulic behavior of Brazilian Oxisols and comparison with soils from temperate regions

Marta Vasconcelos Ottoni (marta.ottoni@sgb.gov.br)¹
Luciana Rodrigues Souza (luciana.souza@sgb.gov.br)¹
Samara M. Barbosa (samara.barbosa1@ufla.br)²
Renata Andrade (renata_andrade@ufla.br)²

Wenceslau Gerales Teixeira (wenceslau.teixeira@embrapa.br)³
Alberto Vasconcellos Inda (alberto.inda@ufrgs.br)⁴
Nilton Curi (ntcuri@gmail.com)²

1. Serviço Geológico do Brasil (SGB)
2. Universidade Federal de Lavras (UFLA)
3. Embrapa Solos
4. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Produto do TED No 016/CPRM/2021, celebrado entre o SGB e a UFLA, tendo como unidade executora a Zetta Agência UFLA de Inovação, Geotecnologia e Sistemas Inteligentes.

Abstract

The association between the mineralogy of the clay fraction, the structure and the physico-hydraulic behavior of the Brazilian Latosols (Oxisols) is addressed here in a global, simple, objective, and instructive context. The simplicity of the mineralogical composition of the clay fraction of Latosols facilitates the understanding of cause and effect relationships in this context. Higher kaolinite contents favor the manifestation of the blocky structure, resulting in higher bulk density values, lower water infiltration rates, and lower potential aquifer recharge. Conversely, higher levels of gibbsite and Fe-oxide minerals (mainly hematite and goethite), in this order, favor the small granular structure of high stability in the subsurface horizon (B) of the Latosols, constituting an unique, peculiar, and distinctive feature of these soils, the most important in Brazilian territory. This implies lower bulk density values, higher water infiltration rates, and higher potential aquifer recharge. A generic comparison with soils from temperate regions reveals consistently much higher values of saturated hydraulic conductivity in Brazilian Latosols and points to the unequivocal need to adopt these values in irrigation projects, hydrology, terraces dimensioning, waterproofing of landfill bottoms, etc., instead of the enormous risk of adopting values of this property from international literature, which do not reflect, even remotely, the Brazilian reality. The functionality of the granular structure, which dominates in Brazilian Latosols, is a reflection mainly of the clay mineralogy (where gibbsite stands out) and overcomes the effect of texture in terms of saturated hydraulic conductivity.

Keywords: structure, mineralogy, Oxisols, temperate soils

Introdução

O papel preponderante dos minerais que compõem a fração argila na formação e na estabilidade da estrutura dos Latossolos é bem conhecido na literatura tropical. O ajuste face a face das placas de caulinita favorece a formação da estrutura em blocos (Resende, 1982; Ferreira; Fernandes; Curi, 1999a). Já a gibbsita, em forma de cunha, dificulta esse ajuste face a face, favorecendo a formação da estrutura granular, de elevada estabilidade, no horizonte Bw (Resende *et al.*, 2014), constituindo uma feição única dos Latossolos brasileiros, particularmente daqueles de textura argilosa e muito argilosa, em comparação aos solos de regiões temperadas, nos quais esse tipo de estrutura não ocorre nos horizontes subsuperficiais.

Convém ressaltar que a estrutura granular no horizonte B dos Latossolos é diferente daquela do horizonte A. No horizonte B, ela tende a ser menor, mais arredondada e mais estável, propiciando macroporosidade e Ksat (condutividade hidráulica saturada) elevadas (Ferreira;

Fernandes; Curi, 1999b), com valores superiores em relação aqueles observados no horizonte A.

No horizonte A, devido aos vários ciclos de umedecimento e secagem, a estrutura se aproxima funcionalmente daquela em blocos (Resende *et al.*, 2021), favorecendo espaços macroporosos e Ksat mais reduzidos comparativamente aos solos com estrutura granular. A consequência disso é que, sob vegetação nativa, a infiltração de água no horizonte A tende a ser menor do que no horizonte Bw dos Latossolos. Sistemas inadequados de manejo dos cultivos agrícolas tendem a degradar a estrutura do horizonte A maximizando esse comportamento diferencial.

É conhecido o fato de que enquanto a caulinita predomina na fração argila da maioria dos Latossolos brasileiros (Kämpf; Curi, 2003), a gibbsita ocorre em teores variáveis (Gomes *et al.*, 2004). A estrutura granular tem sido secundariamente associada à hematita e à goethita, matéria orgânica do solo e atividade biológica.

Trabalhos têm sido desenvolvidos associando a mine-

ralogia da fração argila à estrutura e ao comportamento físico-hídrico de Latossolos em diferentes biomas/ambientes do país, porém, há necessidade de um estudo global no Brasil, o que justifica este trabalho.

Finalmente, a influência da estrutura no comportamento físico-hídrico dos Latossolos é aqui discutida, bem como a comparação desse comportamento com solos de regiões temperadas.

Abrangência do estudo no Brasil

Este estudo engloba Latossolos com diferentes mineralogias, estruturas e atributos físico-hídricos de todas as regiões geográficas brasileiras, incluídos nos bancos de dados dos projetos Hybras V1 (Ottoni *et al.*, 2018) e Hybras V2 (Ottoni *et al.*, 2023, no prelo), coordenados pelo Serviço Geológico do Brasil, além de boletins de levantamentos de solos e artigos científicos extraídos de periódicos.

A localização dos Latossolos estudados, representando 13 estados brasileiros (MS, ES, RJ, DF, RS, BA, MA, AM, SP, GO, PR, MG e PA), é apresentada na Figura 1.

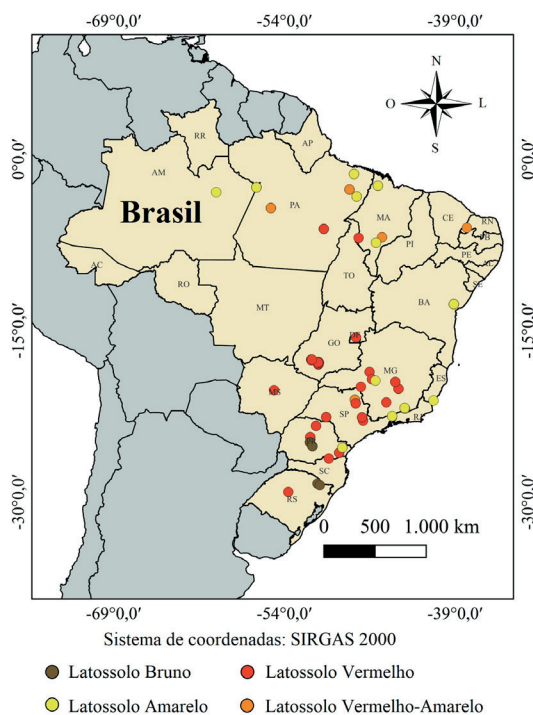


Figura 1. Distribuição dos Latossolos estudados no território brasileiro. Fonte: elaborado pelos autores.

As classes dos Latossolos estudados incluem: os Latossolos Amarelos, os Latossolos Vermelho-Amarelos, os Latossolos Vermelhos e os Latossolos Brunos, abrangendo todas as classes de Latossolos no segundo nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2018), os quais se correlacionam aos Oxisols, no Sistema Americano de Classificação de Solos (Soil Survey Staff, 2014), e aos Ferralsols, no Sistema de Classificação Global de Solos da FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agri-

cultura) (IUSS Working Group, 2022).

A base de dados deste trabalho foi constituída de 96 amostras de horizontes Bw de perfis de Latossolos do território nacional. Desse montante, 28 amostras são de Latossolos Amarelos, 17 de Latossolos Vermelho-Amarelos, 44 de Latossolos Vermelhos e 7 de Latossolos Brunos.

Perfis de Latossolos, estrutura e micromorfologia

A Figura 2 ilustra perfis representativos de cada classe dos Latossolos estudados.



Figura 2. Perfis representativos de Latossolo Amarelo (A), Latossolo Vermelho-Amarelo (B), Latossolo Vermelho (C) e Latossolo Bruno (D). Fotos: cortesia de Sérgio Hideiti Shimizu.

A Figura 3 ilustra tipos de estruturas representativas do horizonte Bw dos Latossolos selecionados para o estudo.

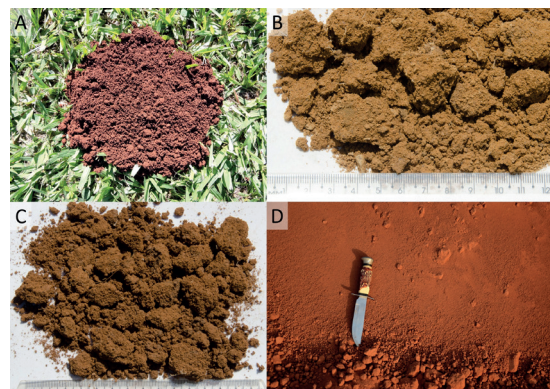


Figura 3. Tipos de estrutura do horizonte Bw: estrutura granular em Latossolo Vermelho (A); estrutura em blocos em Latossolo Amarelo (B); estrutura em blocos em Latossolo Vermelho-Amarelo (C); e estrutura intermediária entre granular e em blocos em Latossolo Vermelho (D). Fotos: cortesia de Gustavo Ribas Curcio e Annette Bonnet (A) e de Sérgio Hideiti Shimizu (B, C e D).

As análises micromorfológicas do horizonte Bw têm mostrado padrões diferenciados para Latossolos mais gibbsíticos (Ferreira; Fernandes; Curi, 1999a; Vidal-Torrado; Chiapini;

Cooper, 2023) e para Latossolos mais caulíníficos (Ferreira; Fernandes; Curi, 1999a).

A microestrutura granular no horizonte Bw dos Latossolos mais gibbsíticos (Figura 4) evidencia pequenos grânulos soltos (menos de 1 mm de diâmetro; Lima, 1988), bem delimitados e com elevada proporção de macroporos, implicando em reduzidos valores de densidade do solo e alta condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) (Ferreira; Fernandes; Curi, 1999a), além de revelar macroporos mais contínuos e menos tortuosos.

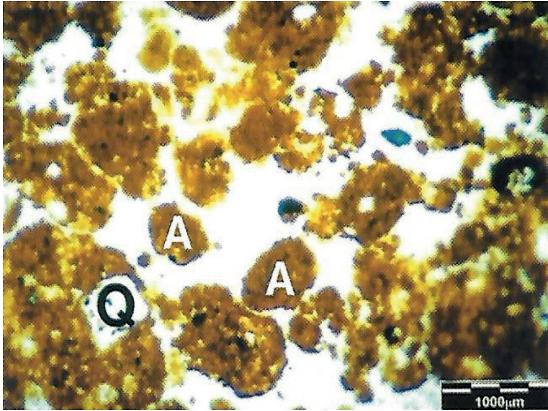


Figura 4. Microestrutura granular no horizonte Bw de Latossolo mais gibbsítico (A – Plasma aglutinado; Q – Grãos de quartzo). Fonte: Ferreira, Fernandes e Curi (1999a).

A estrutura granular, quando bem expressa, determina no solo a existência de duas populações de poros (Figura 5): os macroporos, entre os agregados, e os microporos, no interior dos agregados (Resende *et al.*, 2014). Assim, a água retida nesses solos tende a estar em duas classes distintas: aquela que ocupa os poros maiores do que 1 micrômetro (300 kPa) e aquela que corresponde aos poros com diâmetro equivalente menor que 0,2 micrômetro (1500 kPa), a qual é retida mais fortemente. A consequência disto é uma reduzida proporção de poros entre as duas classes.

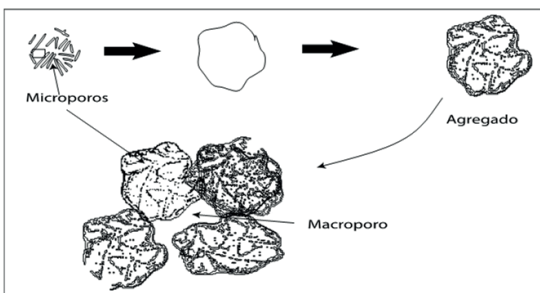


Figura 5. Representação esquemática evidenciando a distribuição de macroporos e microporos nos agregados do horizonte Bw de Latossolos mais gibbsíticos. Fonte: Resende *et al.* (2014).

Os comentários anteriores, em associação ao fato de que a maior parte da água disponível nesse caso está em poros variando de 1 a 30 micrômetros de diâmetro, sugerem que para o horizonte Bw dos Latossolos com alta macroporosidade (Latossolos mais gibbsíticos), uma compactação mais leve poderia ser benéfica por aumentar a quantidade de poros na faixa acima. Em outras palavras, é possível o aumento do teor de água disponível pela transformação de parte dos poros

maiores do que 30 micrômetros (água retida a 10 kPa) em poros menores (Resende *et al.*, 2014). Experimentos de campo nessa linha de pesquisa e desenvolvimento são estimulados.

A presença de camadas pelíticas (de textura fina), em profundidade em Neossolos Quartzarênicos (antigamente denominados Areias Quartzosas), melhora substancialmente esses solos em termos de comportamento hídrico, com reflexos na sua vegetação nativa florestal, em comparação aos Latossolos argilosos e muito argilosos sob Cerrado nativo nas áreas de entorno (Resende; Curi; Santana, 1988). Essa evidência constitui um importante registro da natureza, suportando a sugestão, no parágrafo acima, de que uma redução no tamanho dos macroporos do solo pode aumentar sua capacidade de armazenamento de água disponível para as plantas.

Nos Latossolos mais gibbsíticos com estrutura granular, a condutividade hidráulica não saturada (ou condutividade capilar) é muito alta no início (após saturação pela água da chuva ou de irrigação) e cai bruscamente, em duas semanas, a valores de apenas 0,3 mm/dia (Sans, 1986; Teixeira *et al.*, 2014).

Considerando-se que os registros na literatura consistentemente apontam para uma baixa disponibilidade hídrica nesses solos, enfatiza-se que essa limitação só não é maior devido à grande profundidade efetiva das raízes das plantas e, também, ao acentuado desenvolvimento das raízes profundas no período seco (Resende *et al.*, 2014).

Convém salientar que em comparação à estrutura em blocos, no caso da estrutura granular, as raízes das plantas encontram relativamente mais facilidade para absorver a água presente no sistema.

É preciso destacar que em condições de cultivo intensivo de lavouras sob manejo incorreto, a estrutura granular original do horizonte A (sob vegetação nativa) pode sofrer alteração substancial por compactação (Figura 6), constituindo uma forma de degradação, com sérias consequências físico-hídricas indesejáveis: redução da infiltração de água, aumento da taxa de erosão, aumento da densidade do solo, redução da recarga potencial de aquíferos, aumento potencial de contaminação dos cursos d'água por agrotóxicos, etc.



Figura 6. Horizonte A muito compactado sob lavoura em Latossolo Vermelho na região de Toledo (PR). Foto: cortesia de Gustavo Ribas Curcio e Annete Bonnet.

As análises micromorfológicas da estrutura em blocos no horizonte Bw dos Latossolos (Figura 7) têm evidenciado um

plasma denso, contínuo, como consequência do ajuste face a face das placas de caulinita (Resende, 1982; Ferreira; Fernandes; Curi, 1999a), que não é dificultado pelos menores teores de gibbsita, destacando-se, nesse contexto, os Latossolos Amarelos coesos dos Tabuleiros Costeiros e da Amazônia, e os Latossolos Brunos subtropicais, nos quais os agregados pequenos tendem a se aglutinar em agregados maiores (Lima, 1988).

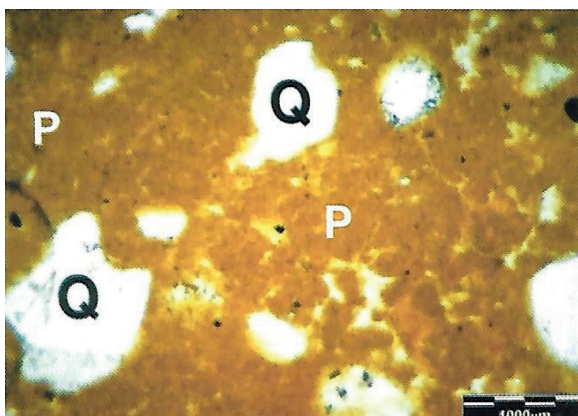


Figura 7. Micrografia da estrutura em blocos no horizonte Bw de Latossolo mais caulínítico (P – plasma; Q – grãos de quartzo). Fonte: Ferreira, Fernandes e Curi (1999a).

Como consequência das considerações no parágrafo anterior, os valores de densidade do solo tendem a ser maiores, a microporosidade mais elevada e menor permeabilidade (Ferreira; Fernandes; Curi, 1999b). Os poros são mais descontínuos e tortuosos.

Vale a pena destacar que, no caso da estrutura em blocos, as raízes das plantas têm muita dificuldade de penetrar no seu interior, restringindo a absorção da água retida.

Mineralogia da fração argila dos Latossolos

A mineralogia da fração argila dos Latossolos estudados foi estimada pelo método de alocação, a partir do teor total de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e TiO₂ do ataque sulfúrico (Resende; Bahia Filho; Braga, 1987), cujas equações para caulinita (Ct) (Equação 1) e gibbsita (Gb) (Equação 2), seguem abaixo:

$$Ct(\%) = 2,15 \times SiO_2(\%) \quad (1)$$

$$Gb(\%) = [Al_2O_3(\%) - 0,396 \times Ct(\%)] \text{ dividido por } 0,654 \quad (2)$$

Como a ilmenita (FeTiO₃) tem o mesmo teor de Fe e de Ti, quando se subtrai Fe₂O₃ – TiO₂, o Fe₂O₃ restante pode ser alocado à hematita + goethita (Hm+Gt) (Equação 3), como segue:

$$Hm + Gt(\%) = Fe_2O_3(\%) - TiO_2(\%) \quad (3)$$

Como ainda não se dispõe de informações específicas abrangentes acerca do efeito diferencial de Hm e Gt no comportamento físico-hídrico dos Latossolos brasileiros, elas estão sendo aqui tratadas em conjunto.

É importante ressaltar que havendo dados disponíveis acerca da substituição em Al na estrutura cristalina da Hm e Gt, esses podem ser incluídos nos cálculos (Resende; Bahia

Filho; Braga, 1987), dependendo do interesse de detalhamento do estudo.

Nos Latossolos Amarelos, devido à virtual ausência de Hm (Kämpf; Curi, 2000), o resultado da Equação (3) pode ser totalmente alocado à Gt.

Na ausência de informações dos teores totais de óxidos do ataque sulfúrico no banco de dados, foram utilizadas neste trabalho as análises de DRX (Difração de Raios X) de boletins de levantamentos de solos e de artigos científicos extraídos de periódicos, da seguinte maneira: as proporções entre Ct, Gb e Hm+Gt foram definidas a partir das áreas das reflexões dos planos hkl 001 da Ct (d = 0,715 nm), 002 da Gb (d = 0,485 nm) e 104 da Hm/130 da Gt (d = 0,269 nm). Para o cálculo das proporções, foi considerada a intensidade relativa dos planos hkl de cada mineral (Ct-001 = 100%, Gb-002 = 100%, Hm-104 = 100% e Gt-130 = 30%).

Atributos mineralógicos, estrutura e comportamento físico-hídrico dos Latossolos brasileiros e sua interpretação

Nas 96 amostras de solos deste estudo, as texturas argilosa e muito argilosa predominaram amplamente (Figura 8), refletindo o elevado grau de intemperismo dos Latossolos. A estatística descritiva é apresentada na Tabela 1 e os box-plots dos atributos na Figura 9.

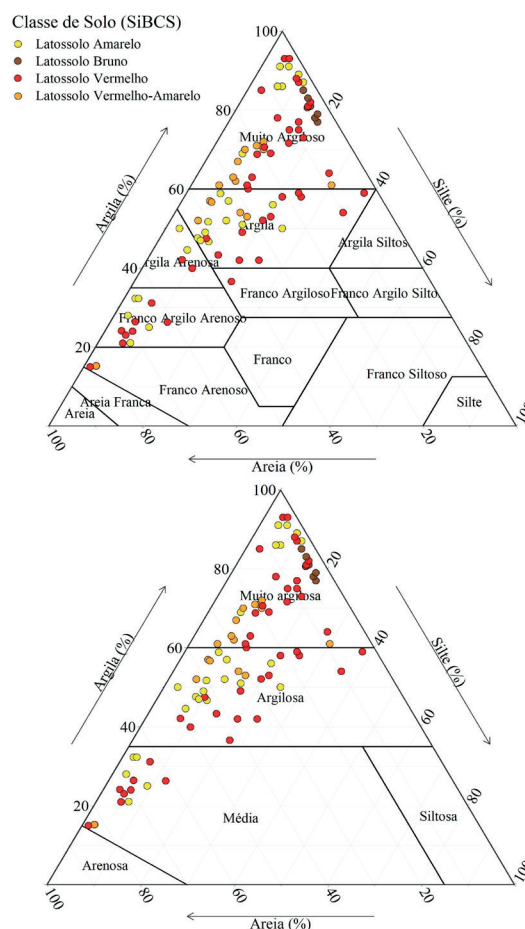


Figura 8. Classes texturais (acima) e grupamentos de textura (abaixo) dos Latossolos estudados. Latossolos Amarelos (28 amostras), Latossolos Vermelho-Amarelos (17 amostras), Latossolos Vermelhos (44 amostras) e Latossolos Brunos (7 amostras). Fonte: elaborado pelos autores.

TABELA 1. Estatística descritiva e número de observações (N) dos atributos estudados dos Latossolos.

Variável	N	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV (%)
Ct (%)	96	0,50	92	40	26	65
Gb (%)	96	0,00	92	16	18	115
Hm+Gt (%)	96	0,00	57	12	12	101
Argila (%)	96	15	93	60	21	35
Silte (%)	96	1	38	12	7	62
Areia (%)	96	2	84	29	23	81
Ds (g/dm ³)	93	0,83	1,68	1,19	0,22	18,16
CO (%)	73	0,10	1,52	0,49	0,32	65,40
Porosidade total (cm ³ /cm ³)	91	0,37	0,69	0,56	0,09	16,59
Macroporosidade (cm ³ /cm ³)	58	0,05	0,37	0,19	0,10	51,05
Microporosidade (cm ³ /cm ³)	58	0,14	0,47	0,34	0,08	22,71
CC10 (cm ³ /cm ³)	51	0,13	0,43	0,30	0,08	26,57
CC33 (cm ³ /cm ³)	42	0,08	0,41	0,27	0,09	33,74
PMP (cm ³ /cm ³)	87	0,05	0,39	0,24	0,08	33,42
AD10 (cm ³ /cm ³)	51	0,04	0,12	0,08	0,02	22,08
Ksat (cm/h)	40	0,00	62,10	7,82	14,61	186,76

Ct – caulinita; Gb – gibbsita; Hm – hematita; Gt – goethita; Ds – densidade do solo; CO – carbono orgânico do solo; CC10 – capacidade de campo – umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 10kPa; CC33 – capacidade de campo – umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 33kPa; PMP – ponto de murcha permanente – umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 1500kPa; AD10 – água disponível (AD10 = CC10 - PMP); Ksat – condutividade hidráulica saturada; DP – desvio padrão; e CV – coeficiente de variação. Fonte: elaborado pelos autores.

A base de dados representou ampla amplitude de valores dos atributos de solos estudados, o que é desejável em trabalhos desta natureza.

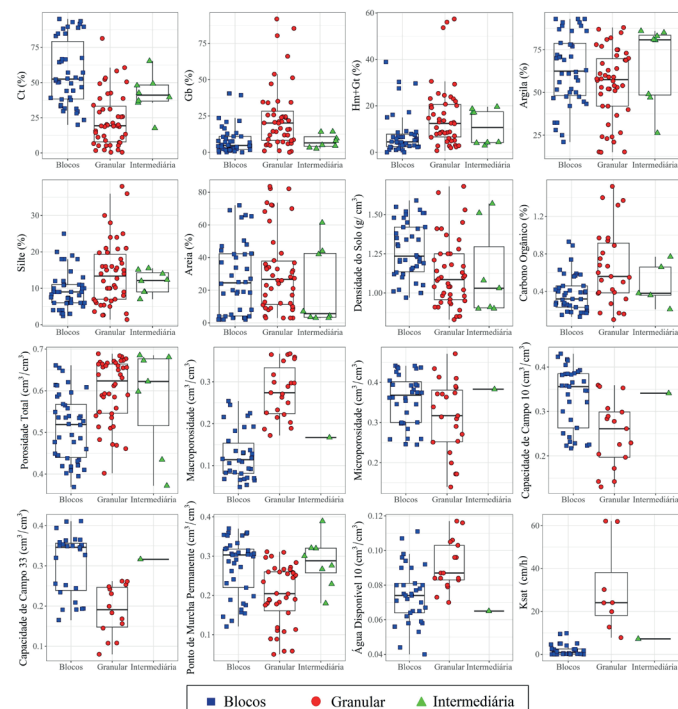


Figura 9. Boxplots das propriedades estudadas do horizonte Bw dos Latossolos. Ct – caulinita; Gb – gibbsita; Hm – hematita; Gt – goethita; capacidade de campo 10: umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 10kPa; capacidade de campo 33: umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 33kPa; ponto de murcha permanente: umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 1500kPa; água disponível 10: CC10 – PMP; e Ksat – condutividade hidráulica saturada. Fonte: elaborado pelos autores.

No horizonte Bw, a estrutura granular esteve representada em 46 amostras, a estrutura em blocos em 42 e a estrutura intermediária, entre granular e em blocos, em 8 amostras.

Os Latossolos com estrutura granular registraram consistentemente valores mais elevados de Gb, Hm+Gt e CO, enquanto os com estrutura em blocos mostraram valores mais elevados de Ct, o que corrobora os resultados dos trabalhos de Resende (1982), Ferreira (1988), Ferreira, Fernandes e Curi (1999a), Kämpf e Curi (2000, 2003), Gomes *et al.* (2004) e Resende *et al.* (2011, 2021).

No tocante à água disponível (AD), considerando as faixas postuladas pelo Bureau of Reclamation (Bureau of Reclamation, 1953) como baixa (AD < 0,06 cm³/cm³), moderada (0,06 < AD < 0,12 cm³/cm³) e alta (AD > 0,12 cm³/cm³), a média dos valores de AD dos Latossolos brasileiros enquadraram-se na classe moderada.

Em média, a Ksat enquadraram-se como alta, mesmo se tratando de Latossolos predominantemente argilosos e muito argilosos, realçando a maior influência da estrutura (com destaque para a estrutura granular) na Ksat, em comparação à textura, segundo os padrões previstos pela Soil Science Division Staff (2017) em cm/h: muito baixa (< 0,0036), baixa (0,0036 – 0,036), moderadamente baixa (0,036 – 0,36), moderadamente alta (0,36 – 3,6), alta (3,6 – 36), e muito alta (>36).

Os resultados aqui encontrados para AD e Ksat são compatíveis àqueles esperados para os Latossolos brasileiros.

Considerando-se que o ataque sulfúrico dissolve basicamente os minerais da fração argila do solo, a Figura 10 mostra a correspondência entre o teor de argila e a soma dos óxidos totais extraídos pelo ataque sulfúrico, discriminando os tipos de estrutura dos Latossolos. A simplicidade da composição mineralógica da fração argila dos Latossolos (Ct, Gb, Hm e Gt, em diferentes proporções) ajuda a explicar o adequado valor de R² de 0,70 da equação de regressão: teor de óxidos totais = 0,7603 x argila(%) + 9,4178, a qual pode ser usada na ausência de dados dos teores de óxidos totais.

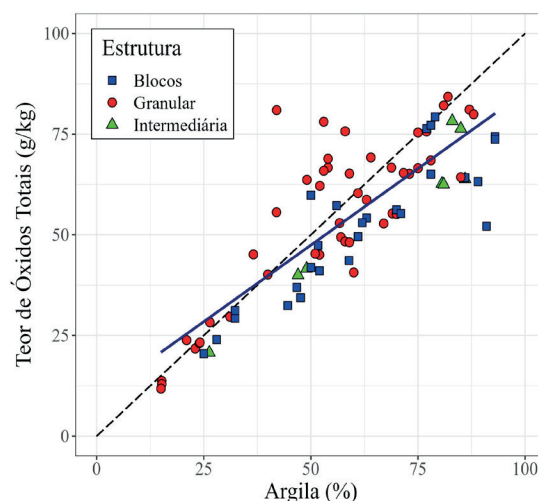


Figura 10. Teor de argila versus teor de óxidos totais do ataque sulfúrico, com discriminação da estrutura, nos Latossolos estudados. Fonte: elaborado pelos autores.

As correlações de Pearson entre os parâmetros estudados são mostradas na Figura 11.

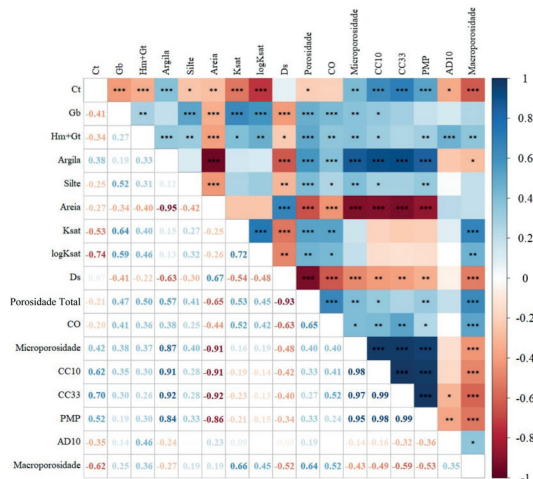


Figura 11. Correlações de Pearson entre as propriedades dos Latossolos estudados. * p-valor < 0,05; ** p-valor < 0,01; e *** p-valor < 0,001. Ct – caulinita (%); Gb – gibbsita (%); Hm – hematita (%); Gt – goethita (%); Argila (%); Silte (%); Areia (%); Ksat – condutividade hidráulica saturada (cm/h); Ds - Densidade do solo (g/cm³); Porosidade Total (cm³/cm³); CO - teor de Carbono Orgânico (%); Microporosidade: umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 6kPa (cm³/cm³); CC10: umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 10kPa (cm³/cm³); CC33: umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 33kPa (cm³/cm³); ponto de murcha permanente: umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 1500kPa (cm³/cm³); AD10: CC10 – PMP (cm³/cm³) - água disponível no solo; Macroporosidade: Porosidade Total - Microporosidade (cm³/cm³) Fonte: elaborado pelos autores.

A Ksat mostrou correlação negativa com a Ct, corroborando o trabalho de Ferreira (1988), isto é, um aumento no teor de Ct nos Latossolos corresponde a uma maior manifestação da estrutura em blocos e uma consequente diminuição nos valores de Ksat (Figura 12). A muito baixa correlação de Ksat com os teores de argila (Figura 11) corrobora a proposição anterior.

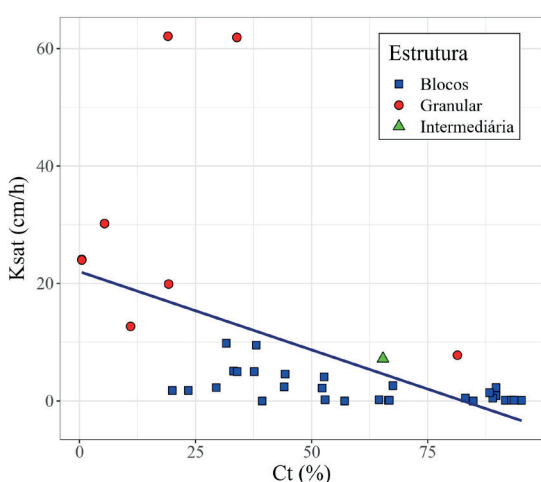


Figura 12. Condutividade hidráulica saturada (Ksat) versus teor de caulinita (Ct), com discriminação da estrutura, nos Latossolos estudados. Fonte: elaborado pelos autores.

A macroporosidade, também, se correlacionou negativamente com a Ct (Figura 11), o que está em concordância com o comportamento expresso no parágrafo anterior. Quando se discriminam as estruturas, os Latossolos com estrutura granular tendem a revelar maiores valores de macroporosidade (Figura 13).

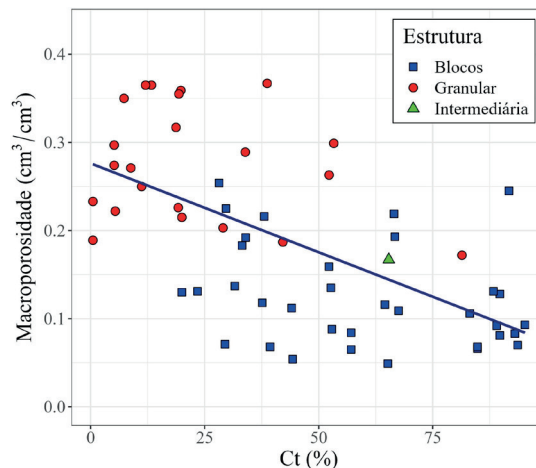


Figura 13. Macroporosidade versus teor de caulinita (Ct), com discriminação da estrutura, nos Latossolos estudados. Fonte: elaborado pelos autores.

A microporosidade evidenciou elevada correlação negativa com o teor da fração areia, seguida de perto pela correlação positiva com o teor da fração argila, sendo esta última mais didática por envolver a água que está associada à maior ASE (área superficial específica) dos minerais de argila dos solos brasileiros, os quais apresentam a seguinte ordem decrescente em m²/g: Gt [104 (30 – 210)] > Hm [64 (10 – 150)] > Ct [52 (10-150)] > Gb (20 – 27) (Resende *et al.*, 2021; Pozza *et al.*, 2009).

A CC (capacidade de campo), no potencial matricial de 10 kPa (CC10) e de 33 kPa (CC33), e o PMP se correlacionaram positivamente com o teor da fração argila. No tocante ao PMP, a relação pode ser considerada direta. No caso da CC10 e CC33, o fenômeno se relaciona ao melhor desenvolvimento da estrutura, possibilitado pelos teores mais elevados da fração argila do solo.

Quando se discriminam as estruturas dos Latossolos no tocante à CC10 (Figura 14) e à CC33 (Figura 15), a maior influência da Ct, refletida na estrutura em blocos, é devido à sua maior ASE, com valores de 52 m²/g (10 – 150), em comparação à Gb, com valores de 20 – 27 m²/g nos solos brasileiros (Resende *et al.*, 2021; Pozza *et al.*, 2009).

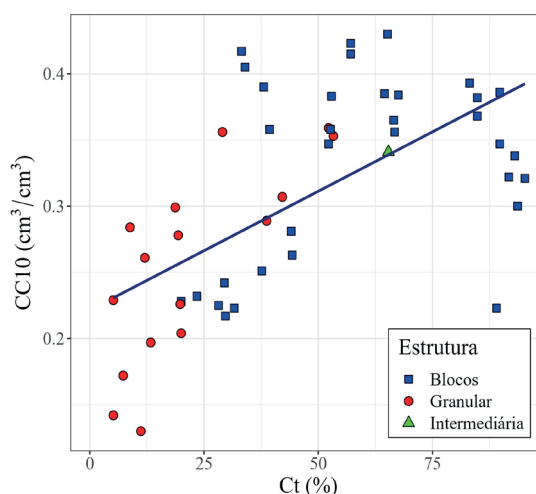


Figura 14. Capacidade de campo no potencial matricial de 10 kPa (CC10) versus teor de caulinita (Ct), com discriminação da estrutura, nos Latossolos estudados. Fonte: elaborado pelos autores.

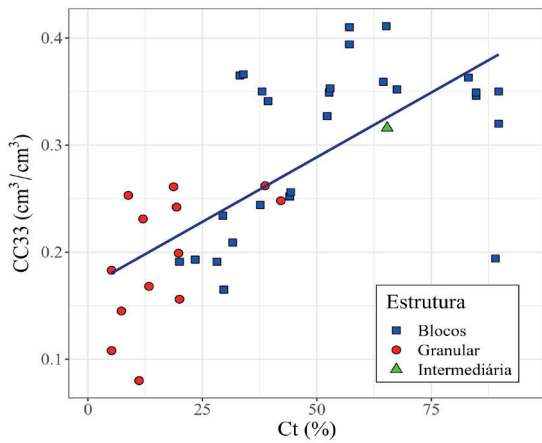


Figura 15. Capacidade de campo no potencial matricial de 33 kPa (CC33) versus teor de caulinita (Ct), com discriminação da estrutura, nos Latossolos estudados. Fonte: elaborado pelos autores.

A AD (CC10 – PMP) não evidenciou correlação clara com nenhuma propriedade individualmente, talvez por ser resultado de multi-interações complexas entre as propriedades dos Latossolos estudados.

As correlações envolvendo PMP, CC33, CC10 e microporosidade versus teor de argila dos Latossolos evidenciaram valor mínimo positivo de $R = 0,84$ (Figura 11).

Já no tocante ao $\log_{10}K_{sat}$ e à macroporosidade, houve destaque para a Ct, evidenciando valores negativos de $R = 0,74$ para $\log_{10}K_{sat}$ e de $0,62$ para macroporosidade (Figura 11).

Num balanço global, a textura foi mais relevante no tocante às propriedades físico-hídricas dos Latossolos relacionadas à retenção de água, com forte influência da ASE, e a estrutura foi mais determinante na K_{sat} e na macroporosidade. A mineralogia mais gibbsítica refletida na estrutura granular ajuda a explicar os valores mais elevados de K_{sat} e de macroporosidade (Resende, 1982; Ferreira, 1988; Ferreira; Fernandes; Curi, 1999a, 1999b; Resende *et al.*, 2014, 2021).

Quando se correlaciona a macroporosidade com o teor da fração argila dos Latossolos, com discriminação da estrutura, podem ser observados dois conjuntos distintos (Figura 16): nos Latossolos com estrutura granular os valores de macroporosidade tendem a decrescer com o aumento do teor de argila, ocorrendo o inverso no tocante aos Latossolos com estrutura em blocos.

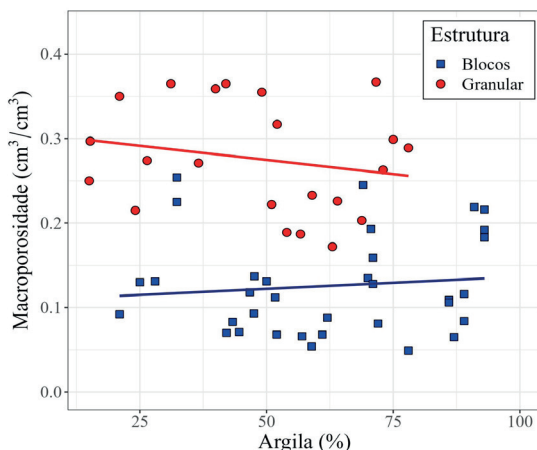


Figura 16. Macroporosidade versus teor de argila, com discriminação da estrutura, nos Latossolos estudados. Fonte: elaborado pelos autores.

A ACP (análise de componentes principais) estratificou nitidamente dois grupos em relação à estrutura: (1) Latossolos com estrutura granular; e (2) Latossolos com estrutura em blocos (Figura 17). Essa constatação demonstra a funcionalidade da estrutura no comportamento físico-hídrico dos Latossolos brasileiros.

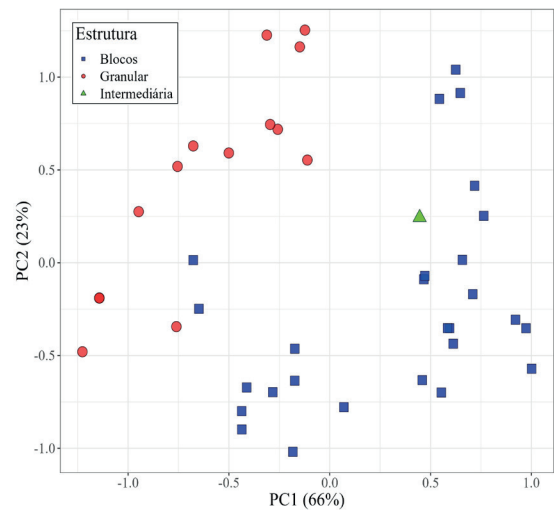


Figura 17. Análise de componentes principais (ACP), considerando as variáveis: densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, umidade volumétrica a 10 kPa (CC10), umidade volumétrica a 33 kPa (CC33), umidade volumétrica a 1500 kPa (PMP) e água disponível (CC10-PMP), discriminadas pela estrutura, dos Latossolos estudados. Fonte: elaborado pelos autores.

Considerações de destaque

A mineralogia da fração argila demonstrou sua importância na explicação e no entendimento do comportamento físico-hídrico dos Latossolos brasileiros, sendo fortemente sugerida sua caracterização, a partir das análises de DRX (considerada a ferramenta primária de identificação dos minerais no solo) ou estimada por meio das equações 1, 2 e 3, na predição das propriedades físico-hídricas desses solos, na ausência dos dados.

Os Latossolos com estrutura granular no horizonte Bw revelaram comportamento físico-hídrico claramente distinto daqueles com estrutura em blocos, reforçando a importância da sua caracterização durante os trabalhos de campo e/ou da consulta aos boletins de levantamentos de solos na predição das propriedades físico-hídricas desses solos na ausência de tais informações.

Comparação com solos de regiões temperadas

Foram utilizados, neste trabalho, os dados constantes em Gupta *et al.* (2021) (excluídos os dados de Latossolos) e em Tempel, Batjes e Van Engelen (1996), envolvendo em ambos os casos o horizonte subsuperficial dos solos de regiões temperadas, totalizando 3.444 amostras, e feitas comparações genéricas com os dados de 96 amostras dos Latossolos brasileiros. A estatística descritiva dos dados de solos de regiões temperadas está apresentada na Tabela 2.

TABELA 2. Estatística descritiva e número de observações (N) das variáveis de interesse envolvendo solos subsuperficiais de regiões temperadas.

Variável	N	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV (%)
Argila (%)	353	0	93	15	17	110
Silte (%)	353	0	84	10	13	131
Areia (%)	353	0	100	75	24	32
Carbono Orgânico CO (%)	612	0,01	8,81	0,63	0,95	152
Ds (g/cm³)	353	0,49	2,09	1,55	0,17	11
Porosidade Total (cm³/cm³)	93	0,30	0,69	0,53	0,10	18
Macroporosidade (cm³/cm³)	58	0,05	0,37	0,19	0,10	51
Microporosidade (cm³/cm³)	369	0,05	0,61	0,27	0,10	38
CC10 (cm³/cm³)	718	0,03	0,79	0,25	0,12	47
CC33 (cm³/cm³)	476	0,04	0,73	0,23	0,11	47
PMP (cm³/cm³)	685	0,01	0,45	0,14	0,09	66
AD10 (cm³/cm³)	484	0,02	0,62	0,13	0,08	62
Ksat (cm/h)	2954	0,00	280,88	1,05	6,08	577,13

Ds – densidade do solo; CO – carbono orgânico do solo; CC10 – umidade volumétrica na capacidade de campo no potencial matricial de 10kPa; CC33 – umidade volumétrica na capacidade de campo no potencial matricial de 33kPa; PMP – umidade volumétrica no ponto de murcha permanente no potencial matricial de 1500kPa; AD10 – água disponível (AD10 = CC10 - PMP); DP – desvio-padrão; e CV – coeficiente de variação. Fonte: adaptado de Gupta *et al.* (2021) (excluídos os dados de Latossolos) e Tempel, Batjes e Van Engelen (1996).

As análises de textura evidenciaram nitidamente valores mais elevados da fração argila nas amostras dos solos do Brasil (Figura 18), em consonância com seu maior grau de intemperismo, uma consequência primária da temperatura mais elevada nos trópicos. Os boxplots comparativos são apresentados na Figura 19. No geral, os valores de Ksat, porosidade total, microporosidade, umidade volumétrica na CC a 10 kPa e umidade volumétrica no PMP foram mais elevados nos Latossolos brasileiros, enquanto os valores de AD e densidade do solo foram geralmente maiores nos solos de regiões temperadas.

No tocante à Ksat, porosidade total e macroporosidade, a predominância da estrutura granular nos Latossolos brasileiros estudados ajuda a explicar os maiores valores.

Já no caso da microporosidade, umidade volumétrica na CC a 10 kPa e umidade volumétrica no PMP, os valores mais elevados nos Latossolos brasileiros encontram respaldo nos teores de argila mais elevados (Figura 18). Convém ressaltar que em condições equiparáveis de teores de argila, os solos de regiões temperadas tendem a apresentar maiores valores de PMP, resultantes de maiores valores de ASE (argilas mais ativas, com maior CTC – capacidade de troca de cátions).

Os maiores valores de AD nos solos de regiões temperadas, provavelmente, estão associados aos seus menores valores de PMP. Os maiores teores de silte nesses solos (Figura 18) tendem a reter mais água nas proximidades da CC, porém, devido a sua baixa ASE (maior tamanho de partícula), eles tendem a apresentar valores mais reduzidos de umidade volumétrica no PMP (Teixeira *et al.*, 2021).

Já os maiores valores de densidade dos solos de regiões temperadas parecem estar relacionados à sua maior propor-

ção da estrutura em blocos em comparação aos Latossolos brasileiros, nos quais predomina a estrutura granular. Adicionalmente, os solos comparados são de classes granulométricas diferentes, com o predomínio de maiores teores de areia nos solos de regiões temperadas (Figura 18), tendendo a aumentar os valores de densidade do solo.

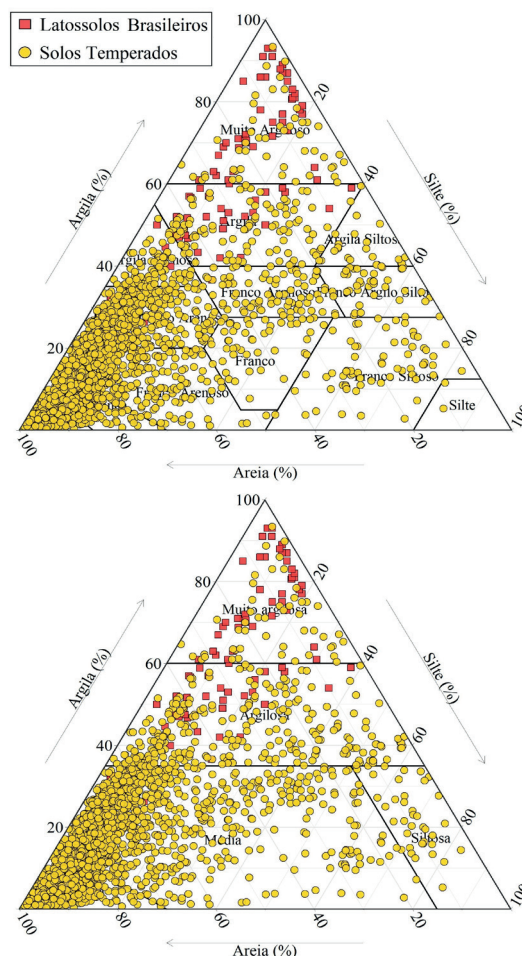


Figura 18. Classes texturais e grupamentos de textura envolvendo Latossolos brasileiros e solos de regiões temperadas. Fonte: elaborado pelos autores.

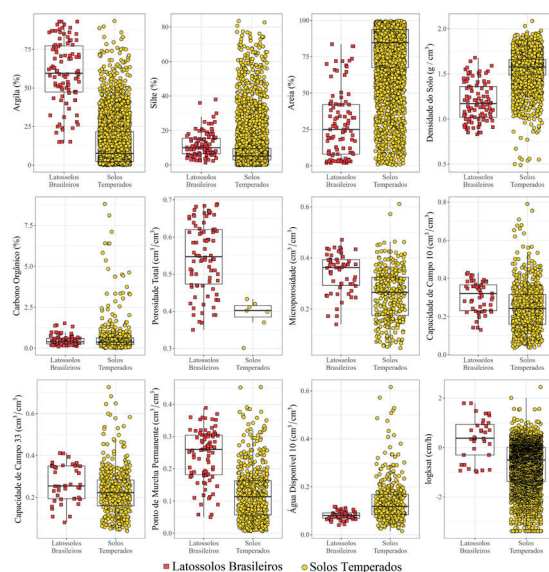


Figura 19. Boxplots comparando valores de propriedades físico-hídricas de Latossolos brasileiros e de solos de regiões temperadas. Fonte: elaborado pelos autores.

Considerações de destaque

De maneira geral, os Latossolos brasileiros revelaram maiores teores de argila e valores mais elevados de Ksat, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e umidade volumétrica na CC a 10 kPa e no PMP, em relação aos solos de regiões temperadas.

Os solos de regiões temperadas registraram, no geral, valores mais elevados de AD e densidade do solo, em comparação aos Latossolos brasileiros.

A mineralogia da fração argila dos Latossolos brasileiros, representada basicamente por caulinita, gibbsita, hematita e goethita, em diferentes proporções, contrasta muito com a dos solos de regiões temperadas, onde geralmente se destacam esmectitas, vermiculitas, micas, caulinitas, cloritas e minerais intermediários entre dois ou mais tipos, baixos teores de goethita e, principalmente, de hematita, e baixíssimos teores ou ausência de gibbsita, além de maiores teores de argilominerais com baixo grau de cristalinidade.

A simplicidade (menor número de constituintes) da composição mineralógica da fração argila dos Latossolos brasileiros ajuda a entender sua associação com a estrutura deles, com destaque para a estrutura granular, a qual dominou no horizonte Bw dos Latossolos neste trabalho, e representa uma feição única, típica e peculiar desses solos, contrastando substancialmente com a mineralogia da fração argila dos solos de regiões temperadas e com seu consequente comportamento físico-hídrico.

A adoção de valores de Ksat da literatura internacional, como em projetos de irrigação, hidrologia, dimensionamento de terraços e impermeabilização de fundos de aterros sanitários, é extremamente arriscada, considerando-se os valores muitíssimo mais elevados dessa propriedade nos Latossolos (os solos dominantes no Brasil), inclusive naqueles de textura argilosa e muito argilosa, em comparação com solos argilosos de regiões temperadas. A funcionalidade da estrutura granular (reflexo da mineralogia, principalmente da gibbsita), no tocante à Ksat nos Latossolos, sobrepuja o efeito da textura.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM), Embrapa Solos, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Samara Martins Barbosa; Renata Andrade; e Nilton Curi agradecem ao SGB-CPRM pelas bolsas de estudo concedidas.

Referências

BUREAU OF RECLAMATION (United States). **Manual: irrigated land use. Land classification, volume 5, part 2.** Washington, DC: US Government Printing Office, 1953.

FERREIRA, M.M. **Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos brasileiros.** 79 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1988.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 507-514, 1999a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/snNMPmc5hsYYckc8MJkFSPp/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 7 dez. 2023.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 515-524, 1999b. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300004>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/5pQFSBL8tH9gjqS6gPwmMB/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 7 dez. 2023.

GOMES, J.B.V.; CURI, N.; MOTTA, P.E.F.; KER, J.C.; MARQUES, J.J.G.S.M.; SCHULZE, D.G. Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 137-153, fev. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/YqNHPQbCSVL4s4ZbVnmYsKQ/>. Acesso em: 7 dez. 2023.

GUPTA, S.; HENGL, T.; LEHMANN, P.; BONETTI, S.; OR, D. SoilKsatDB: global database of soil saturated hydraulic conductivity measurements for geoscience applications. **Earth System Science Data**, Gottingen, v. 13, n. 4, p. 1593-1612, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-13-1593-2021>. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/13/1593/2021/>. Acesso em: 7 dez. 2023.

IUSS WORKING GROUP WRB. **World reference base for soil resources**: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th. ed. Vienna, Austria: IUSS, 2022. Disponível em: https://www.isric.org/sites/default/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf. Acesso em: 7 dez. 2023.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E. (ed.). **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. I, p. 107-138.

KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: CURI, N. et al. (ed.). **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. III, p. 1-54.

- LIMA, P.C. **Micromorfologia de “horizonte B” de latossolos do Sudeste e Sul do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa; SN-LCS; SBCS, 1988. p. 391-411. 3ª Reunião de Classificação, Correlação de Solos e Interpretação da Aptidão Agrícola.
- OTTONI, M.V.; OTTONI FILHO, T.B.; SCHAAP, M.G.; LOPES-ASSAD, M.L.R.C.; ROTUNNO FILHO, O.C. Hydrophysical database for brazilian soils (HYBRAS) and pedotransfer functions for water retention. **Vadose Zone Journal**, New Jersey, v. 17, n. 1, p. 1-17, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2017.05.0095>. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/vzj2017.05.0095>. Acesso em: 7 dez. 2023.
- OTTONI, M.V.; SOUZA, L.R.; CORINTO, L.M.; BARBOSA, S.M.; SILVA, V.O.; SILVA, B.M.; AVANZI, J.C.; LIMA, L.A.; TEIXEIRA, W.G.; FONTANA, A.; PIMENTEL, L.G.; MORAES, M.L.; CURI, N. **Hydrophysical database for brazilian soils: a holistic and updated version**. Göttingen: Earth System Science Data, 2023. No prelo..
- POZZA, A.A.A.; CURI, N.; GUILHERME, L.R.G.; MARQUES, J.J.G.S.M.; COSTA, E.T.S.; ZULIANI, D.Q.; MOTTA, P.E.F.; MARTINS, R.S.; OLIVEIRA, L.C.A. Adsorção e dessorção aniônicas individuais por gibbsita pedogenética. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 99-105, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000100019>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/m47hnmYRNL-rJmskFKZJMvYy/>. Acesso em: 7 dez. 2023.
- RESENDE, M. **Pedologia**. Viçosa, MG: UFV, 1982. 100 p.
- RESENDE, M.; BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M. Mineralogia da argila de latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, p. 17-23, 1987.
- RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J.C.; REZENDE, S.B. **Mineralogia de solos brasileiros: interpretações e aplicações**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2011. 206 p.
- RESENDE, M.; CURI, N.; POGGERE, G.C.; BARBOSA, J.Z.; POZZA, A.A.A.; TEIXEIRA, A.F.S. **Pedologia, fertilidade, água e planta: inter-relações e aplicações**. 2. ed. Lavras, MG: Editora UFLA, 2021. 263 p.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F.; KER, J.C. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 6. ed. Lavras, MG: Editora UFLA, 2014. 378 p.
- RESENDE, M.; CURI, N.; SANTANA, D.P. **Pedologia e fertilidade do solo: interações e aplicações**. Brasília, DF: Lavras: Piracicaba: MEC; ESAL; POTAFOS, 1988. 83 p.
- SANS, L.M.A. **Estimativa do regime de umidade, pelométrico de Newhall, de um latossolo vermelho-escuro ácido da região de Sete Lagoas, MG**. 190 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1986.
- 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. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 7 dez. 2023.
- SOIL SCIENCE DIVISION STAFF. **Soil survey manual**. Washington, DC: USDA, 2017. (United States Department of Agriculture Handbook; 18). Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/soil-survey-manual>. Acesso em: 7 dez. 2023.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12. ed. Washington, DC: USDA, 2014. Disponível em: <https://nrcs.app.box.com/s/xi57bj6zyo601eokr7v715mkdpeaa81h/file/1147478400323>. Acesso em: 7 dez. 2023.
- TEIXEIRA, W.G.; SCHROTH, G.; MARQUES, J.D.; HUWE, B. Unsaturated soil hydraulic conductivity in the central Amazon: field evaluations. In: TEIXEIRA, W.G.; CEDDIA, M.B.; OTTONI, M.V.; DONNAGEMA, G.K. (ed.). **Application of soil physics in environmental analyses: measuring, modelling and data integration**. Berlin: Springer, 2014. p. 283-305.
- TEIXEIRA, W.G.; VICTORIA, D.C.; BARROS, A.H.C.; LUMBRERAS, J.F.; ARAÚJO FILHO, J.C.; SILVA, F.A.M.; LIMA, E.P.; BUENO FILHO, J.S.S.; MONTEIRO, J.E.B.A. **Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no zoneamento agrícola de risco climático**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; 272).
- TEMPEL, P.; BATJES, N.H.; VAN ENGELEN, V.W.P. **IGBP-DIS soil data set for pedotransfer function development**. Wageningen, Netherlands: International Soil Reference and Information Centre, 1996. (Working Paper and Preprint; 96/05).
- VIDAL-TORRADO, P.; CHIAPINI, M.; COOPER, M. Micromorfologia dos solos da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos (RCC de Goiás e Tocantins). In: SANTOS, G.G.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, R.E.M.; MADARI, B.E. (ed.). **Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Goiás e Tocantins**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 396-457. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1155338/guia-de-campo-da-xiv-reuniao-brasileira-de-classificacao-e-correlacao-de-solos-rcc-de-goias-e-tocantins>. Acesso em: 8 dez. 2023.



**INFORME DE MINERALOGIA DE LATOSSOLOS
BRASILIEROS**

V.1, N.1. 2023

Publicação on-line seriada do Serviço Geológico do Brasil – SGB
Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial
Departamento de Hidrologia - DEHID

Disponível em: rigeo.cprm.gov.br

Serviço Geológico do Brasil – SGB
Av. Pasteur, 404 Urca - Rio de Janeiro - RJ - BRASIL
CEP: 22.290-255
Telefone:(21) 2295-0032
Contatos: seus@sgb.gov.br

CRÉDITOS TÉCNICOS

Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial: Alice Silva de Castilho

Departamento de Hidrologia: Andrea de Oliveira Germano

Editor: Marta Vasconcelos Ottoni

Corpo Editorial: Nilton Curi, Marta Vasconcelos Ottoni, Renata Andrade

Corpo de revisores: Marta Vasconcelos Ottoni, Nilton Curi, Renata Andrade, Wenceslau Geraldtes Teixeira

Revisão de texto: Irinéa Barbosa da Silva

Normalização bibliográfica: Rede de Bibliotecas Ametista

Editoração eletrônica: Divisão de Editoração Geral – DIEDIG