

GUSTAVO MAGALHÃES NUNES BARBOSA

**GÊNESE E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE VERTISSOLOS DO  
ESTADO DA BAHIA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da  
Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

B238g  
2017  
Barbosa, Gustavo Magalhães Nunes, 1988-  
Gênese e caracterização geotécnica de Vertissolos do Estado da  
Bahia : . / Gustavo Magalhães Nunes Barbosa. - Viçosa, MG, 2017.  
vii; 123f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: João Carlos Ker.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Solos – Caracterização. 2. Solos expansivos. 3. Caulinita. I.  
Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Doutorado  
em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

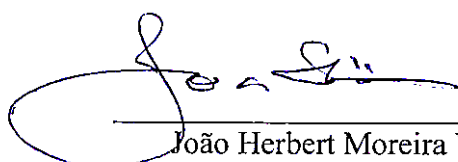
CDD 22. Ed. 631.4

GUSTAVO MAGALIÃES NUNES BARBOSA

**GÊNESE E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE VERTISSOLOS DO  
ESTADO DA BAHIA**

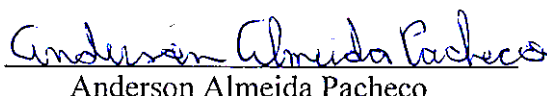
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 04 de dezembro de 2017



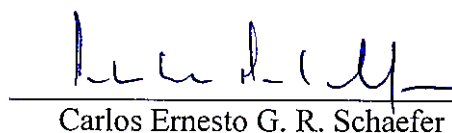
---

João Herbert Moreira Viana



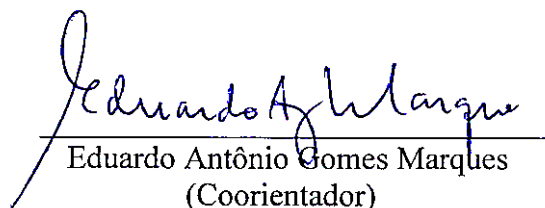
---

Anderson Almeida Pacheco



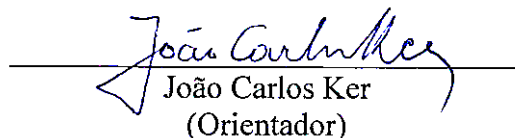
---

Carlos Ernesto G. R. Schaefer



---

Eduardo Antônio Gomes Marques  
(Coorientador)



---

João Carlos Ker  
(Orientador)

## AGRADECIMENTOS

Ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Trânsito (DNIT) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro. Ao Programa de Pós-Graduação em Solos de Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realização do doutorado e pelo complemento da minha bolsa de estudos. Aos técnicos laboratoriais do Departamento de Solos pelo suporte e ensinamentos durante a realização das análises.

Ao professor Luiz Eduardo Dias (DPS/UFV), por me conceder a primeira parte da bolsa de estudos, o que foi crucial para meu ingresso no programa de pós-graduação. Ao professor Igor Rodrigues de Assis (DPS/UFV), pelos seis anos de orientação e por me ajudar e intervir ao meu favor sempre que foi necessário. Agradeço ao professor João Carlos Ker (DPS/UFV), que se dispôs a me orientar durante o doutorado e com quem foi uma honra trabalhar. Ao professor Eduardo A. G. Marques (DEC/UFV), pela orientação e por sempre estar disponível a me ajudar nos momentos que foram necessários. Ao Dr. Anderson Pacheco, meu coorientador extraoficial, por todos os ensinamentos e contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Dr. Tony Jarbas (Embrapa Semiárido) e ao professor Luciano Souza (UFRB) pelo suporte técnico oferecido para a coleta e descrição dos perfis de solo. Agradeço também à empresa Agrovale (Juazeiro-BA) por colaborar com a coleta do material de pesquisa, cedendo uma das áreas de interesse e mão-de-obra para abertura de um dos perfis estudados. Ao professor Carlos Ernesto Schaefer (DPS/UFV) e ao Dr. João Herbert Viana (Embrapa Milho e Sorgo), pelas contribuições dadas a este trabalho.

Agradeço aos meus pais e irmãos, por sempre me apoiarem neste estágio da minha vida, me fortalecendo nos momentos mais difíceis. À Camila Semidi, por passar comigo todos os momentos turbulentos, os quais ninguém conheceu, exceto ela, sempre me inspirando e fazendo surgir dentro de mim uma força que por várias vezes nem imaginava existir. Aos meus amigos, especialmente Gabriel Almeida, Mairon Coelho, Luíza Nauter e Guilherme Musse, os quais sempre representaram um desafogo durante minha jornada e com os quais tive os meus melhores momentos em Viçosa. Por fim, agradeço a Deus por sempre mostrar uma luz nos momentos em que parecia não ter saída.

Muito obrigado!

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vii</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
<b>Gênese de Vertissolos.....</b>	<b>3</b>
Fatores de formação do solo .....	3
<i>Material de origem .....</i>	<i>3</i>
<i>Vertissolos do Brasil.....</i>	<i>4</i>
<i>Vertissolos do Estado da Bahia .....</i>	<i>5</i>
Clima.....	6
Relevo .....	7
Tempo .....	9
Propriedades físicas e morfológicas e suas relações com os fatores de formação .....	10
<i>Cor do solo.....</i>	<i>10</i>
<i>Textura do solo .....</i>	<i>11</i>
<i>Densidade do solo.....</i>	<i>13</i>
<i>Distribuição de poros e dinâmica da água no solo .....</i>	<i>13</i>
<i>Expansão e contração.....</i>	<i>17</i>
<i>Desenvolvimento da estrutura .....</i>	<i>18</i>
<i>Formação de slickensides.....</i>	<i>19</i>
<i>Pedoturbação.....</i>	<i>20</i>
<b>Ocorrência de esmectitas e caulinita em Vertissolos .....</b>	<b>21</b>
Esmectitas .....	21
Caulinita.....	22
Relação molecular Ki.....	23
<b>Geotecnia de solos expansivos.....</b>	<b>24</b>
Caracterização geotécnica.....	25
<i>Curva de compactação.....</i>	<i>25</i>
<i>Ângulo de atrito .....</i>	<i>26</i>
<i>Limites de Atterberg e granulometria.....</i>	<i>27</i>
Fatores físicos e químicos que influenciam no comportamento geotécnico .....	28
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>30</b>
<b>GÊNESE DE VERTISSOLOS DO ESTADO DA BAHIA .....</b>	<b>38</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>38</b>

<b>Abstracty</b> .....	<b>38</b>
<b>Introdução</b> .....	<b>39</b>
<b>Material e métodos</b> .....	<b>41</b>
Áreas de estudo .....	41
Caracterização física e química.....	43
Caracterização mineralógica.....	45
<b>Resultados</b> .....	<b>45</b>
Atributos morfológicos .....	45
Características químicas.....	48
Características físicas.....	52
Características mineralógicas.....	55
<i>Frações areia e silte</i> .....	55
<i>Fração argila</i> .....	58
<b>Discussão</b> .....	<b>64</b>
Vertissolos da região Semiárida.....	64
Vertissolos do Recôncavo Baiano.....	65
<b>Conclusões</b> .....	<b>68</b>
<b>Referências bibliográficas</b> .....	<b>69</b>
<b>CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE VERTISSOLOS DO ESTADO DA BAHIA</b> .	<b>72</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>72</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>72</b>
<b>Introdução</b> .....	<b>73</b>
<b>Material e métodos</b> .....	<b>74</b>
Solos selecionados e áreas de estudo .....	74
Caracterização geotécnica.....	77
<i>Curva granulométrica</i> .....	77
<i>Limites de Atterberg</i> .....	78
<i>Coefficiente de expansão linear</i> .....	79
<i>Ensaio de compactação de Proctor</i> .....	79
<i>Cisalhamento direto do solo saturado</i> .....	80
Análise estatística.....	81
<b>Resultados</b> .....	<b>81</b>
Granulometria, limites de Atterberg e COLE .....	81
Ensaio de compactação de Proctor.....	86
Ensaio de cisalhamento direto do solo saturado .....	89
<b>Discussão</b> .....	<b>90</b>

Influência da granulometria e do tipo de argila no potencial de expansão do solo.....	90
Ensaio de compactação de Proctor.....	93
Cisalhamento direto .....	97
<b>Conclusões .....</b>	<b>100</b>
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>101</b>
<b>CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>105</b>

## RESUMO

BARBOSA, Gustavo Magalhães Nunes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2017. **Gênese e caracterização geotécnica de Vertissolos do Estado da Bahia**. Orientador: João Carlos Ker. Coorientadores: Igor Rodrigues de Assis e Eduardo Antônio Gomes Marques

Características atípicas quanto à gênese de solos vérticos foram previamente observadas no município de Juazeiro-BA e da região do Recôncavo, como a predominância de caulinita em clima semiárido e de argilominerais expansivos em clima úmido. Assim, este trabalho teve como objetivo realizar caracterizações química, física, mineralógica e geotécnica dos solos vérticos destas regiões e buscar compreender como os processos de formação do solo influenciaram nas suas pedogêneses e como a mineralogia destes solos pode influenciar suas propriedades físicas e geotécnicas. Para isso, foram selecionados três perfis de Vertissolo na região Semiárida e três na região do Recôncavo. Para cada solo selecionado foram realizadas as caracterizações morfológica, física, química, mineralógica e geotécnica, as quais foram relacionadas com fatores de formação, como clima, paleoclima, relevo e geologia. Quanto à gênese dos solos estudados, observou-se, para a região Semiárida, que os Vertissolos são mais intemperizados quando próximos ao rio São Francisco. O perfil mais próximo ao rio São Francisco apresentou estágio de intemperismo mais avançado do que o esperado para Vertissolos, o que está provavelmente relacionado com o aporte de material previamente intemperizado. Os baixos teores de argilominerais 2:1 observados para este perfil foram suficientes para a formação de características vérticas. No Recôncavo, foi observado a maior influência do material de origem como fator de formação, devido a presença de estratificação horizontal e por originar solos com granulometria fina, o que implica em uma drenagem imperfeita e desacelera o processo de intemperismo. Quanto aos atributos geotécnicos, foi observado que o potencial de expansão do solo está relacionado com o teor de argila e com a presença de argilas expansivas nos solos. A melhor eficiência na compactação do solo foi observada para o Vertissolo caulínico, que apresentou maior adensamento em função do aumento da umidade. Observou-se ainda, que a coesão do solo saturado aumentou com o aumento de caulinita e diminuiu com o aumento do teor de argila, para solos de mineralogia semelhantes. Por sua vez, o ângulo de atrito interno do solo saturado ( $\phi$ ) foi mais influenciado pela granulometria, em que maiores teores de areia e cascalho proporcionaram maiores  $\phi$ , independentemente do tipo de argila presente.

## ABSTRACT

BARBOSA, Gustavo Magalhães Nunes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2017. **Genesis and geotechnical characterization of Vertisols of the State of Bahia.** Advisor: João Carlos Ker. Co-advisors: Igor Rodrigues de Assis and Eduardo Antônio Gomes Marques

Atypical characteristics regarding the genesis of vertic soils were previously observed in the municipality of Juazeiro-BA and the Recôncavo region, as the predominance of kaolinite in semi-arid climate and expansive clay-minerals in humid climate. Thus, the objective of this work was to perform chemical, physical, mineralogical and geotechnical characterization of the soils of these regions and to understand how soil formation processes influenced their pedogenesis and how the mineralogy of these soils can influence their physical and geotechnical properties. For this, three profiles of Vertisol were selected in the semi-arid region and three in the Recôncavo region. For each selected soil, morphological, physical, chemical, mineralogical and geotechnical characterizations were performed, which were related to forming factors, such as climate, paleoclimate, relief and geology. As for the genesis of the studied soils, it has been observed, for the semi-arid region, that the Vertisols are more weathered when near the São Francisco River. The profile closest to the São Francisco River presented a more advanced stage of weathering than expected for Vertisols, which is probably related to the contribution of previously weathered material. The low levels of 2:1 clay minerals observed for this profile were sufficient for the formation of vertic characteristics. In the Recôncavo, it was observed the greater influence of the parent rock as a formation factor, due to the presence of horizontal stratification and to originate soils with fine particle size, which implies an imperfect drainage and slows down the process of weathering. Regarding the geotechnical attributes, it was observed that the soil expansion potential is related to the clay content and the presence of expansive clays in the soils. The best soil compaction efficiency was observed for the kaolinitic Vertisol, which presented higher density as a function of moisture increase. It was also observed that cohesion of the saturated soil increased with increasing kaolinite and decreased with increasing clay content for similar mineralogical soils. On the other hand, the internal friction angle of saturated soil ( $\phi$ ) was more influenced by granulometry, in which higher levels of sand and gravel provided higher  $\phi$ , independently of the type of clay.

## INTRODUÇÃO

O sistema de rodovias é o principal meio de transporte de cargas e passageiros no Brasil, especialmente no que diz respeito ao escoamento de produtos agrícolas. O agronegócio brasileiro é uma das principais fontes de geração de riqueza para o país, responsável por aproximadamente 30 % do produto interno bruto (PIB), por 35 % da mão de obra empregada e por 40 % das exportações nacionais, no entanto, seu crescimento é por vezes limitado à falta de manutenção ou recuperação das redes viárias (Correa e Ramos, 2010).

Neste sentido, a recuperação do trecho da BR-253, que liga Juazeiro-BA à Carira-SE, tem um importante papel de interligar a região semiárida ao litoral, facilitando o escoamento de produtos agrícolas do Vale do São Francisco, e, conseqüentemente, contribuindo para o desenvolvimento da região. A BR-235 passa ainda por importantes pontos turísticos do Estado da Bahia, como a cidade de Canudos, o Paredão das Araras e a Estação Ecológica Raso da Catarina, tornando o turismo histórico e ecológico da região mais acessível.

O projeto de implantação e pavimentação da BR-235, executado pelo DNIT, tem ainda como objetivo incentivar o desenvolvimento científico, por meio de financiamento de projetos de pesquisa desenvolvidos na região de influência da rodovia. Dentro dos projetos científicos financiados, está o estudo pedogenético e geotécnico dos Vertissolos, de Juazeiro-BA, na região semiárida, e do Recôncavo Baiano, sub clima úmido.

Em ambas as regiões, os Vertissolos constituem importantes áreas de cultivo agrícola, devido, principalmente, à sua elevada fertilidade natural, no entanto, problemas de natureza física, devido à presença de argilas expansivas, limitam o cultivo destes solos. Estas limitações podem ser tanto pela dificuldade do uso de mecanização, devido à grande plasticidade e pegajosidade do solo, ou pela quebra de raízes ocasionada pelos processos de contração e expansão.

Entretanto, as características destes solos mudam de acordo com o ambiente em que se encontram, podendo ter suas características químicas, físicas, mineralógicas e geotécnicas influenciadas por fatores climáticos, paleoclimáticos, geológicos e de relevo.

A caracterização mineralógica, química, física e geotécnica pode, portanto, explicar as influências do meio físico sobre os atributos dos solos, promovendo uma visão integrada entre o comportamento do solo e o meio ambiente. Além disto, a caracterização auxilia na compreensão da gênese dos solos, em que podem ser observadas importantes evidências para reescrever a história climática e até mesmo morfológica das áreas de estudo.

Deste modo, o presente trabalho teve como objetivo realizar a caracterização mineralógica, física, química e geotécnica dos Vertissolos do município de Juazeiro-BA e do Recôncavo Baiano, buscando compreender a influência do meio físico em sua pedogênese.

# REVISÃO DE LITERATURA

## GÊNESE DE VERTISSOLOS

### Fatores de formação do solo

#### *Material de origem*

Vertissolos se desenvolvem em uma vasta gama de materiais de origem, abrangendo desde materiais alóctones a autóctones. Dentre estes, os sedimentos alóctones pelíticos são mais comuns, apresentando áreas de ocupação mais extensas que os autóctones, sendo encontrados principalmente nas partes mais baixas da paisagem (Mermut et al., 1996c). Os tipos clássicos ocorrem em intrusões de basalto em grandes massas de terra, como na Austrália (Hoskin, 1935), na Índia (Simonson, 1954; Raychaudhuri et al., 1963), na África do Sul (Van Der Merwe, 1950) e na América do Sul (FAO, 1957). Estes solos também se desenvolvem comumente em rochas calcárias, desde materiais inconsolidados até os mais duros corais (Oakes e Thorp, 1951; Ahmad e Jones, 1969a, 1969b; Duchafour, 1977). Outros tipos de rochas também podem estar associados com Vertissolos, como gnaisse, por exemplo (Bal, 1935). De acordo com Mohr et al. (1972), pode-se também encontrar Vertissolos derivados de xisto, gabro, diabásio, dolerito e serpentinito.

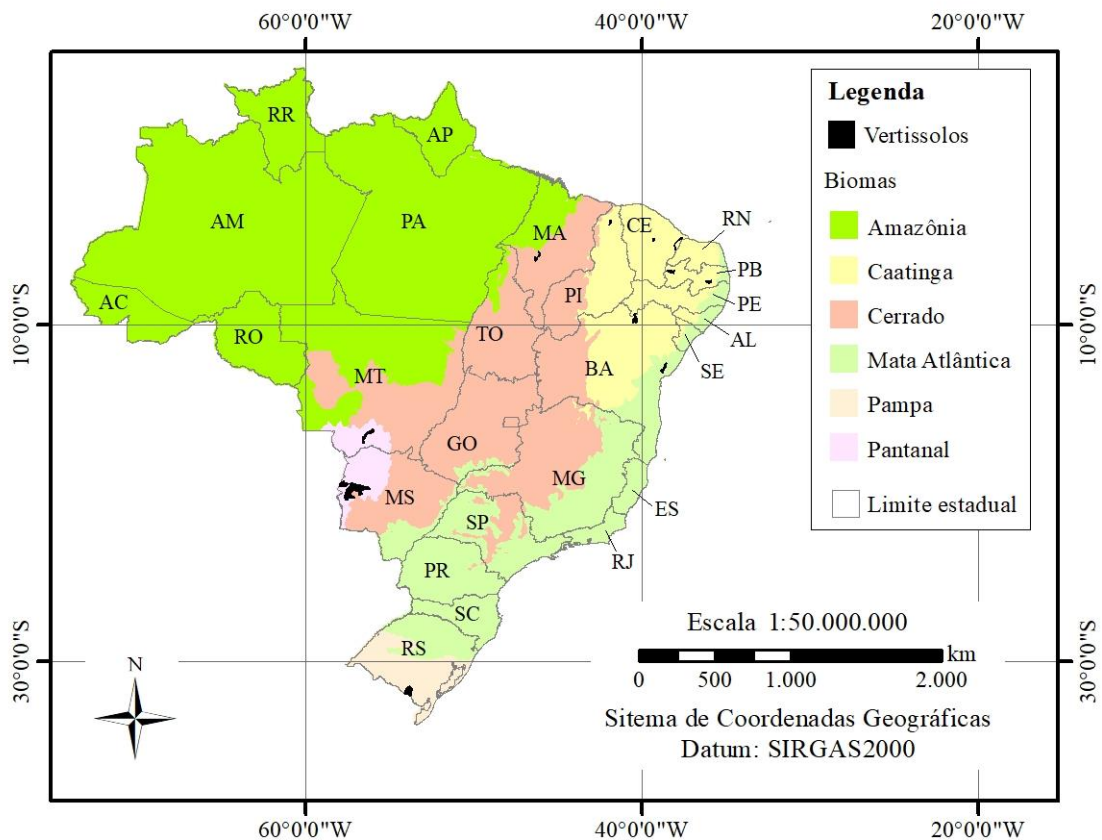
A formação de Vertissolos também é comum em depósitos sedimentares, como depósitos deltáicos nos EUA (Kunze et al., 1963), depósitos lacustres em Trinidad (Brown e Bally, 1968), glacio-lacustre em Saskatchewan (Mermut e Acton, 1985) e depósitos marinhos na Guiana (FAO, 1966).

Os Vertissolos podem se desenvolver *in situ*, a partir dos materiais de origem mencionados, no entanto estão geralmente associados com materiais transportados (Eswaran et al., 1988).

## *Vertissolos do Brasil*

No Brasil, a ocorrência de Vertissolos está intimamente relacionada à presença de material de origem derivado de calcários, sedimentos argilosos ricos em cálcio e magnésio e rochas básicas (Oliveira et al., 1992).

Na região Sul, os Vertissolos ocorrem mais comumente no Rio Grande do Sul (Figura 1), ocupando cerca de 1 % da área total do Estado. Nesta região, são formados a partir de basalto, argilitos e siltitos, principalmente (Lemos et al., 1973). Na região Centro-Oeste, os Vertissolos ocorrem no bioma Pantanal (Figura 1) e seu desenvolvimento está relacionado com a presença de material calcário, como calcários dolomíticos, material coluvial de origem calcária e depósitos calcários contendo tufos calcários, travertinos e conglomerados com cimento calcário (Spera et al., 1993).



**Figura 1.** Biomas (IBGE, 2004) e ocorrência de Vertissolos (Santos et al., 2011) no Brasil.

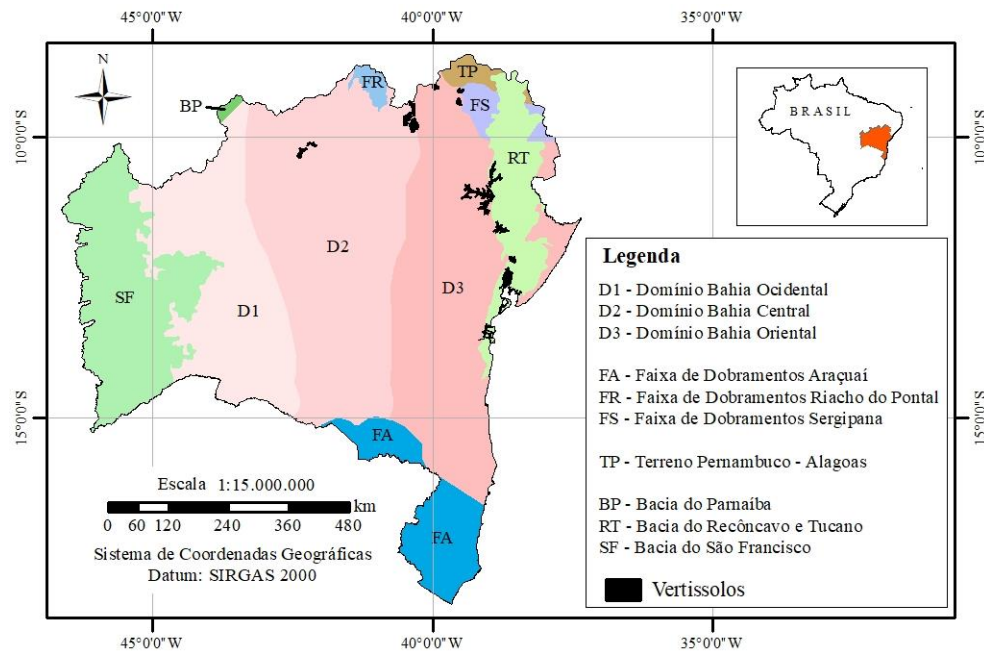
Da Região Nordeste (Figura 1) ao norte do Estado de Minas Gerais, os Vertissolos ocorrem principalmente sobre depósitos aluviais e rochas metamórficas de granulometria fina, como calcários, folhelhos, argilitos e xistos (Jacomine et al., 1971, 1972, 1975a, 1975b, 1975c, 1979b, Araújo Filho et al., 2000, 2012). No entanto, também é relatado sua ocorrência sobre migmatito, biotita-gnaïsse (Araújo Filho et al., 2000) e em material sedimentar com presença de rochas básicas (Araújo Filho et al., 1999).

Na Região Norte do país, a maior concentração de Vertissolos está no Estado do Acre, ocupando cerca de 3 % da área total. Nesta região o principal material de origem dos Vertissolos são os argilitos e siltitos (Kloster et al., 2013). Os Vertissolos ocorrem ainda em outros estados brasileiros, como no Rio de Janeiro, derivado de material colúvio-aluvial de rocha calcária (Mothci et al., 1979), no norte do Tocantins (Falesi, 1972) e no noroeste do Pará (Vieira et al., 1971), ambos derivados de rochas básicas. No entanto, em todos estes Estados, os Vertissolos ocorrem de forma pontual, apresentando pouca expressividade.

#### ***Vertissolos do Estado da Bahia***

Os Vertissolos ocupam uma área menor que 1 % do Estado da Bahia, ocorrendo, principalmente nas regiões Semiárida do Recôncavo Baiano (Jacomine et al., 1979b).

O material de origem destes solos se diferencia de acordo com o domínio litoestrutural em que se encontram (Jacomine et al., 1979b; Dalton de Souza et al., 2003). Na Bacia do Recôncavo e Tucano (Figura 2), os Vertissolos são formados sobre rochas sedimentares pelíticas do Cretáceo, como folhelhos e argilitos.



**Figura 2.** Domínios litoestruturais (Dalton de Souza et al., 2003) e ocorrência de Vertissolos (Jacomine et al., 1979b) no Estado da Bahia.

No Domínio Bahia Oriental (Figura 2), as áreas de Vertissolos ocorrem sobre formações geológicas compostas principalmente por rochas vulcânicas básicas, gnaisses migatíticos e ortognaisses.

No Domínio Bahia Central (Figura 2), os Vertissolos são formados principalmente sobre o calcrete da Formação Caatinga, que é constituído por material sedimentar do período Quaternário proveniente da alteração de rochas calcáreas, e sobre sedimentos recentes do Quaternário, os quais ocorrem em áreas mais próximas às margens do Rio São Francisco.

## Clima

Os Vertissolos são geralmente encontrados em áreas com precipitação média anual entre 500 e 1250 mm (Oakes e Thorp, 1951; Dudal, 1965), sob clima desértico, árido, semiárido, monção tropical, equatorial, mediterrâneo seco, temperado sub-úmido (Dudal, 1965) e temperado ameno (Oakes e Thorp, 1951). Entretanto, a ocorrência de Vertissolos não está restrita a estas áreas, podendo ser encontrados em regiões com precipitação média anual superior a 3000 mm, como na Guiana e em Trinidad e Tobago (Mermut et

al., 1996c), e em áreas com clima frio e seco, como nas pradarias canadenses, onde a precipitação anual gira em torno de 200 a 400 mm, com temperatura média entre 4 e 6,6 °C (Mermut et al., 1996b).

A gênese destes solos não está ligada apenas ao clima, mas também à sazonalidade das chuvas, o que possibilita ciclos de umedecimento e secagem no solo, desenvolvendo atributos físicos característicos, além de uma baixa taxa de intemperismo, associada à síntese da montmorilonita. A variação da temperatura e da precipitação atua promovendo o intemperismo na época chuvosa e favorecendo o acúmulo de cátions básicos nas estações secas (Compton, 1967).

A presença de um período seco, em que a evapotranspiração excede a precipitação, é uma característica das áreas de ocorrência de Vertissolos. Os períodos secos são importantes para induzir a formação de fendas nos solos, até mesmo em regiões mais frias, como no Canadá (Dasog et al., 1987), embora a intensidade de fendilhamento seja menor do que em climas mais quentes.

No Brasil, os Vertissolos podem ser encontrados em diferentes condições climáticas, desde clima sub-tropical com precipitação anual média de 1350 mm, como o Rio Grande do Sul (Lemos et al., 1973), a clima semiárido com taxa de precipitação entre 400 e 700 mm anuais (Jacomine et al., 1979b). Estes solos são ainda encontrados em clima tropical úmido com precipitação anual de 2000 mm, no Estado do Acre, sendo sua gênese relacionada ao paleoclima seco e à dificuldade de intemperização das rochas pelíticas (Bardales, 2005).

## **Relevo**

O efeito do relevo do desenvolvimento dos Vertissolos deve ser avaliado considerando as escalas macro e micro, sendo a formação de microrrelevo *gilgai* pouco comum para áreas de Vertissolos no Brasil. Deste modo, os Vertissolos brasileiros sofrem maior influência da situação de relevo local em que se encontram.

De modo geral, os Vertissolos ocorrem em regiões com relevo relativamente plano e altitudes inferiores a 1000 m. Young (1976) afirmou que, de modo geral, a declividade máxima do relevo para a formação do Vertissolo é de 3 %, enquanto Mohr et al. (1972) relataram que é comum a formação destes solos em declividades de até 5 %. Dudal (1965)

também mencionou que a grande maioria dos Vertissolos estão presentes em declividades que não ultrapassam 5 %, mas que é possível a sua ocorrência em declividades superiores a 15 %, embora seja pouco comum.

No Caribe, os Vertissolos ocorrem comumente em declividades superiores a 5 %. Em Trinidad e Tobago, a maior parte das áreas ocupadas por este solo apresentam declividades entre 10 e 20 %, enquanto nas ilhas vulcânicas a declividade varia entre 20 e 35 % (Ahmad, 1983). A presença de Vertissolos em relevos acentuados não é comum, mas pode ser explicada pela atividade geológica ou outros processos de formação de montanhas. Nestes casos, vários Vertissolos foram formados em depósitos de argila de origem vulcânica, lacustre ou marinha, posteriormente soerguidos (Ahmad, 1983).

Estes Vertissolos desenvolvidos em relevos íngremes são bastante susceptíveis à erosão superficial, seja laminar ou em sulco, devido ao deslizamento ou desmoronamento das camadas superficiais do solo. Estes processos erosivos também ocorrem em Vertissolos desenvolvidos em relevo menos íngreme, no entanto, de forma menos marcante (Ahmad, 1983).

Os Vertissolos ocorrem em diferentes formas de terreno, como em grandes platôs na Índia, em planícies costeiras no Texas e em grandes bacias continentais no Sudão e em parte da Austrália. Áreas de Vertissolos com relevo plano ou quase plano são encontradas nas bacias aluviais e em terraços marinhos ou fluviais (Ahmad, 1983). Quando o relevo não é totalmente plano, os Vertissolos tendem a se formar nas partes mais baixas da paisagem, especialmente quando não há uma rede de drenagem eficiente, favorecendo encharcamento do terreno e, conseqüentemente, o acúmulo de sílica em solução, o que aumenta a estabilidade das argilas do tipo 2:1 (Legros, 2012).

Este fenômeno ocorre, por exemplo, em Cuba, onde encontram-se Vertissolos desenvolvidos em margas. Embora apresente um clima favorável ao desenvolvimento deste solo, a sua formação depende da posição topográfica. Os Vertissolos mais típicos (háplicos) são formados nas depressões das paisagens em uma superfície de intemperismo formada *in situ* ou ligeiramente transportada por colúvio.

Em grandes áreas planas ou quase planas de Vertissolos, o acúmulo das argilas 2:1 ajuda no processo de salinização. Este tipo de argila dá ao solo uma grande capacidade de expansão, promovendo uma drenagem lenta, o que leva ao acúmulo da água das chuvas

na superfície por um longo período de tempo (Dudal, 1965). Nestas áreas, a água flui lentamente para as partes mais baixas do terreno, onde se acumulam formando brejos ou terrenos pantanosos (Ahmad, 1983). A partir deste ponto, como não existem redes de drenagem eficientes, a água é perdida predominantemente por evapotranspiração (Ahmad, 1983).

## **Tempo**

Vertissolos são considerados solos jovens devido ao baixo nível de desenvolvimento do perfil. Um dos fatores que contribuem para o baixo desenvolvimento destes solos é o pouco tempo de desenvolvimento, visto que vários Vertissolos se formaram a partir de materiais de origem recentes, da era Cenozoica, como materiais vulcânicos e depósitos aluviais, lacustres, pluviais e marinhos (Ahmad, 1983).

O tempo de formação dos horizontes dos Vertissolos pode ser estimado pela datação de alguns carbonatos presentes no solo, como dolomita, aragonita e calcita, que contêm  $^{14}\text{C}$  (Podwojewski, 1995). No entanto, este método não apresenta alta confiabilidade, visto que as concreções carbonáticas podem ser formadas ou transformadas em um horizonte já formado (Legros, 2012).

De qualquer maneira, os Vertissolos são formados rapidamente. Parsons et al. (1973) relataram a formação de um Vertissolos em superfícies geomórficas de apenas 550 anos. A formação de slickensides também é um processo rápido, o que leva entre 100 e 1000 anos para ocorrer (Yaalon, 1971). Um exemplo de slickensides bastante jovens foi relatado por Blokhuis (1982), em Vertissolos da Romênia, em que sua formação ocorre em menos de 200 anos.

Podwojewski (1994) afirmou que a formação completa de um Vertissolo exige um tempo entre 20 e 60 mil anos. Outros autores estimaram tempos semelhantes, como Quantin (1992), que afirmou que seriam necessários de 15 a 30 mil anos para a formação de um Vertissolo de 1 m de profundidade, a partir de cinzas vulcânicas. No entanto, considera-se que, em média, sejam necessários cerca de 40 mil anos para a obtenção de um solo com máxima expressão das características vérticas (Legros, 2012).

Outro fator que colabora com o baixo nível de desenvolvimento dos Vertissolos é a pedoturbação. Ela ocorre tanto no sentido vertical como no horizontal, limitando o

desenvolvimento individual de cada horizonte do solo. Em muitos casos, a pedoturbação camufla as evidências de diferença de intemperismo, lixiviação e formação de agregados em diferentes partes do perfil (Ahmad, 1983).

O clima e o relevo também influenciam no tempo de desenvolvimento dos Vertissolos. Como abordado anteriormente, a formação destes solos é favorecida em relevos aplainados e sob condições climáticas que apresentem chuvas escassas e mal distribuídas. Estes dois fatores de formação agindo em conjunto, dificultam o processo de intemperismo, principalmente por manter altos níveis de sílica, e cátions básicos, como Ca e Mg, na solução do solo, pois são constantemente liberados pelos materiais de origem ricos em bases (Ahmad, 1983). Quando isto ocorre, a estabilidade dos argilominerais 2:1 é favorecida, dificultando assim, o desenvolvimento do solo (Ahmad, 1983).

Por vezes, os Vertissolos ocorrem em lugares inesperados, no que diz respeito às condições climáticas. Nestes casos, é importante observar o paleoclima e buscar o último período favorável à formação destes solos (Legros, 2012). Por exemplo, no arquipélago de Vanuatu, na região da Melanésia, Oceania, presume-se que o material de origem foi formado em um período de maior aridez, que poderia ter sido a última época glacial, a cerca de 18 mil anos atrás (Podwojewski, 1994).

Em topografias acidentadas, os Vertissolos erodem rapidamente, principalmente se forem cultivados, dependendo da utilização de práticas conservacionistas como plantio em curvas de nível e terraceamento. Em áreas úmidas, como na maior parte do Caribe, é comum a ocorrência de deslizamento e desmoronamento do solo, levando à formação de áreas com erosão laminar e em sulco. Estes processos removem continuamente a superfície do solo, deixando-o raso e pedologicamente pouco evoluído (Ahmad, 1983).

### **Propriedades físicas e morfológicas e suas relações com os fatores de formação**

#### ***Cor do solo***

Os Vertissolos apresentam comumente uma coloração escura, principalmente na camada superficial, chegando a ser considerada como uma característica essencial para esta classe de solo (Ahmad, 1983). Esta coloração ocorre devido à associação da matéria orgânica, principalmente ácidos húmicos (Singh e Singh, 1960; Duchaufour e

Dommergues, 1963), com partículas muito finas de argila (Dudas e Pawluk, 1969), tornando-se resistente à oxidação.

Climas úmidos e temperados favorecem a complexação dos argilominerais com a matéria orgânica, sendo em regiões que apresentam estas condições climáticas que esta complexação ocorre de forma mais expressiva. Por outro lado, em regiões de climas áridos e semiáridos, os Vertissolos tendem a apresentar coloração bruno avermelhada, devido ao menor acúmulo de matéria orgânica (Dudal, 1965; Nordt et al., 2004).

O relevo também exerce um importante papel na expressão das cores dos Vertissolos. A coloração escura é comumente expressa locais nas depressões da paisagem, onde o acúmulo de matéria orgânica é favorecido. Além disto, a adsorção da matéria orgânica sobre as superfícies dos argilominerais é facilitada em condições anaeróbicas, assim, a coloração escura geralmente ocorre em Vertissolos que, pelo menos em parte do ano, estão em condições de alagamento (Mermut et al., 1996c).

Por outro lado, relevos mais acidentados apresentam maior taxa de lixiviação, facilitando a formação de caulinita e óxidos de ferro e, conseqüentemente, a formação de Vertissolos mais cromados (Coulombe et al., 1996). A presença de óxidos de ferro nos Vertissolos pode contribuir para uma maior ou menor expressão do croma, dependendo da fase em que se encontra. Por sua vez, óxidos de manganês e titânio contribuem para a expressão da coloração escura, como em alguns Vertissolos do Avaí, onde a presença da magnetita ( $Fe_3O_4$ ) e da ilmenita ( $FeTiO_3$ ) é mais importante para a formação da cor escura do que a própria matéria orgânica (Raymundo, 1965).

A coloração dos Vertissolos também pode variar devido ao tipo de material de origem. As maiores variações de cores são observadas em Vertissolos formados a partir de materiais aluviais recentes que não apresentavam, originalmente, propriedades vérticas. Nestes locais as cores variam entre tons de cinza e bruno ou bruno avermelhado. A ocorrência de Vertissolos que não apresentam coloração escura pode ser observada quando formados a partir de depósitos costeiros, flúvicos e deltáicos nas regiões tropicais mais úmidas (Ahmad, 1983).

### ***Textura do solo***

De maneira geral, os Vertissolos apresentam altos teores de argila, variando comumente entre 30 e 80 % (Ahmad, 1983; Acquaye et al., 1992), podendo ainda alcançar

valores superiores a 90 %, como relatado para Vertissolos ácidos do Caribe (Ahmad, 1985).

Os teores de areia e silte presentes nos Vertissolos estão relacionadas com o material de origem. Solos desenvolvidos a partir de depósitos aluviais, sejam estes costeiros, deltaicos ou depressões no interior do continente, tendem a apresentar baixo conteúdo de areia (Ahmad, 1983). A quantidade de areia dos solos formados *in situ*, a partir da decomposição de rochas básicas, é bastante variável, visto que depende do teor de quartzo presente na rocha matriz (Ahmad, 1983). O teor de areia também é bastante variável nos Vertissolos desenvolvidos sobre rochas calcárias, sendo um reflexo do teor de impurezas insolúveis presentes no material de origem (Ahmad e Jones, 1969a, 1969b).

Os Vertissolos não apresentam variações expressivas do conteúdo de argila em profundidade, até o ponto em que se atinge a camada de transição entre o solo e o material de origem, onde há uma diminuição drástica do teor de argila. Este comportamento é mais perceptível em Vertissolos derivados de cinzas vulcânicas ou de depósitos aluviais de textura fina (Ahmad, 1983).

A textura é um importante fator para o desenvolvimento da estrutura dos Vertissolos, pois interfere na capacidade de expansão e contração. Um alto conteúdo de areia, por exemplo, reduz a capacidade de expansão, pois, além de reduzir a quantidade relativa de argila expansiva, promove maior atrito interno nos agregados (Wilding e Tessier, 1988; Little et al., 1992).

A granulometria exerce também um importante papel no grau de desenvolvimento e no tipo de estruturas formadas, tanto nas camadas superficiais, quanto em subsuperfície. Na camada superficial, um maior conteúdo de areia promove a formação de agregados maiores, quando comparados aos formados em solos mais argilosos, não apresentando autogranulação (Kaloga, 1966).

Existem ainda diversos estudos (Coughlan et al., 1973; Yule e Ritchie, 1980b; Thompson e Beckmann, 1982; Freebairn e Wockner, 1986; Pillai-McGarry e Collis-George, 1990; Wilding et al., 1991) que comprovam a relação entre o aumento do teor de argila e o maior desenvolvimento da estrutura dos Vertissolos. Alguns autores defendem ainda que o fator mais crítico para o desenvolvimento da estrutura seria o alto teor de argila fina (<0,2 µm), que poderia, inclusive, compor mais de 80 % da fração argila dos

Vertissolos. No entanto, não é comum a descrição do teor de argila fina nos estudos sobre a relação entre a granulometria e a estrutura.

### ***Densidade do solo***

Devido à propriedade expansiva da argila, a densidade dos Vertissolos varia de acordo com a umidade do solo. De modo geral, valores mais baixos de densidade do solo são encontrados com o aumento da umidade. Estudos realizados em Trinidad (Fox, 1964a; Berndt e Coughlan, 1977; Fadl e Ali, 1977) ilustraram o efeito da expansão do solo na densidade. Amostras secas em estufa apresentaram uma densidade do solo alta, com média de  $2,3 \text{ g cm}^{-3}$ , quando comparadas às amostras com umidade em equilíbrio com um potencial mátrico de  $-33 \text{ kPa}$  e àquelas umedecidas até o limite de liquidez, que apresentaram médias das densidades do solo iguais a  $1,1$  e  $0,89 \text{ g cm}^{-3}$ , respectivamente.

Deve-se lembrar, no entanto, que as pequenas rachaduras também fazem parte do solo, sendo contabilizadas como porosidade. Com isso, a densidade do solo também pode variar dependendo do tamanho das amostras coletadas, principalmente se coletadas em anéis volumétricos. Quando se coletam amostras pequenas, a densidade dos Vertissolos tem valores entre  $1,3$  a  $2,0 \text{ g cm}^{-3}$ , (Dudal, 1965; Stace et al., 1968), tendendo a diminuir com o aumento das amostras, devido à maior quantidade de pequenas fendas presentes. Este comportamento ocorreu em Vertissolos de Trinidad, onde amostras coletadas com anéis volumétricos de  $15 \times 15 \text{ cm}$  apresentaram densidade do solo variando entre  $0,8$  a  $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ , em uma faixa de umidade de  $80$  a  $40 \%$ , respectivamente (Ahmad, 1983).

### ***Distribuição de poros e dinâmica da água no solo***

A variação do conteúdo de água nos Vertissolos provoca mudanças quantitativas do sistema poroso e, conseqüentemente, do volume do solo. A redução da umidade do solo promove uma redução do espaço poroso, a qual pode ser mensurada por meio do índice de vazios ( $e$ ), em que se relaciona o volume de poros ( $V_p$ ) com o volume de partículas ( $V_s$ ) de uma amostra de solo (Equação 1) (Kutílek, 1996). Neste caso, o volume de partículas substitui o volume total do solo ( $V$ ), como utilizado mais comumente para a determinação da porosidade total ( $P_t$ ) ( $P_t = V_p/V$ ), visto que se mantém constante em função da variação de umidade.

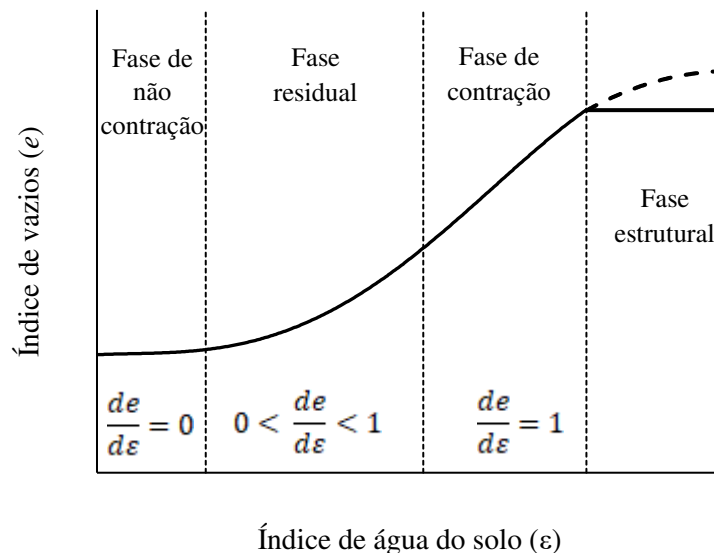
$$e = \frac{V_p}{V_s} \quad (1)$$

Esta inconstância do volume do solo também dificulta a determinação da umidade volumétrica do solo, sendo então preferível se utilizar a umidade gravimétrica ou mesmo o índice de água do solo ( $\varepsilon$ ) (Equação 2) (Smiles e Rosenthal, 1968). Neste último, o volume de água ( $V_a$ ) é também relacionado com o volume das partículas ( $V_s$ ), devido à sua constância.

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_s} \quad (2)$$

A redução do volume de poros nem sempre é proporcional à redução do volume de água, variando de acordo com a faixa de umidade em que o solo se encontra. Deste modo, a redução do espaço poroso pode ser dividida em quatro fases: estrutural (Yule e Ritchie, 1980a); de contração; residual e de não contração (Haines, 1923).

Na fase estrutural, a água é liberada dos macroporos localizados entre os *peds* (entre-agregados) ou até mesmo de alguns microporos maiores localizados dentro dos *peds* (intra-agregados). Como estes são os poros mais estáveis, não uma variação do volume do solo a nível macroscópico (Figura 3) (Kutílek, 1996).



**Figura 3.** Variação do volume do solo em função da variação da umidade (Kutílek, 1996).

Na fase de contração é observada a maior redução do volume do solo em função da redução da umidade. Nesta fase, a água perdida não é substituída pelo ar, o que resulta numa redução do volume de poros proporcional ao volume de água perdido (Figura 3) (Kutílek, 1996).

A fase residual tem início quando o ar começa a substituir parte da água perdida, resultando numa menor diminuição do volume do solo em relação à redução do volume de água (Kutílek, 1996). Já na fase de não contração, a água perdida é composta pela humidade higroscópica, havendo praticamente total substituição do volume de água por ar, o que resulta na não contração do solo, a nível macroscópico (Kutílek, 1996).

A variação do volume de poros em função da umidade causa um processo dinâmico em que promove mudanças nas proporções dos tipos de poros presentes no solo. Os poros dos Vertissolos podem ser divididos, de acordo com sua funcionalidade, em três tipos: submicroscópicos; capilares e não capilares (Corey, 1977).

São considerados como submicroscópicos aqueles que têm espessura inferior ao diâmetro da molécula de água. Estes poros apresentam uma contribuição desprezível para o volume total de poros (menos de 1 % da porosidade total), no entanto são importantes para o processo de floculação das partículas do solo (Kutílek, 1996).

Os poros capilares são aqueles que apresentam diâmetros suficientemente grandes para a penetração da água e suficientemente pequenos para a formação de meniscos, sendo, portanto, a capilaridade responsável pelo fluxo de água (Kutílek, 1996). Este tipo de fluxo depende, dentre outros fatores, da viscosidade da água, a qual tende a aumentar à medida em que há a aproximação da superfície das partículas. Como as argilas do expansivas, como a montmorilonita, apresentam maior área superficial específica do que as argilas não expansivas, como a caulinita, há um maior aumento da viscosidade da água nos solos expansivos (Kutílek, 1972). Portanto, este aumento da viscosidade da água não é desprezível para Vertissolos, o que pode dificultar ou tornar errônea a determinação da condutividade hidráulica (CH) quando a viscosidade da água é determinada apenas pela temperatura (Kutílek, 1996).

Os poros capilares podem ser tanto intra-agregados quanto entre-agregados. Os intra-agregados compõem uma grande parcela dos poros totais do solo, no entanto são pouco eficientes para a drenagem do solo, devido ao seu pequeno diâmetro (Kutílek,

1996). Os entre-agregados apresentam maior diâmetro e maior eficiência para a drenagem interna do solo, assim, quando estes poros são saturados há uma diminuição na CH (Kutílek, 1996).

Os poros não capilares são aqueles em que o fluxo de água não ocorre por capilaridade. Quando não saturados, a água contida nestes poros se encontra aderida na sua superfície, em forma de filme (Kutílek, 1996). A drenagem dos poros não capilares não causa alterações no volume do solo, porém quando o solo expande e as fendas de fecham eles se tornam poros capilares entre-agregados (Kutílek, 1983).

A distribuição dos tipos de poros também muda de acordo com a profundidade. As camadas mais profundas estão submetidas a maiores sobrecargas e menor variação de umidade, o que torna os processos de formação de estrutura e de fendilhamento menos intensos. Deste modo, com o aumento da profundidade ocorre um aumento dos poros capilares intra-agregados em relação aos entre-agregados e não capilares (Kutílek, 1996).

A CH dos Vertissolos também sofre influência de atributos químicos, como a porcentagem de sódio trocável (PST) e a condutividade elétrica (CE). Com o aumento da PST e a diminuição da CE, ocorre o alargamento da dupla camada difusa e do potencial zeta, o que promove a expansão do solo e reduz os microporos médios e grandes. Neste cenário há também uma maior dispersão das partículas, que podem ser transportadas e depositadas nos poros, entupindo-os. A combinação destes dois fatores, portanto, resulta na diminuição da CH do solo. Por outro lado, o aumento da CE, mesmo em solos com alta PST, promove a compressão da dupla camada difusa, conferindo maior estabilidade os agregados, aumentando assim a CH (Van Olphen, 1977; Iwata et al., 1988).

Este comportamento promove variações sazonais da CH em Vertissolos irrigados em regiões semiáridas. Nestas situações a água usada para a irrigação apresenta, geralmente, maior CE do que a água das chuvas, o que ajuda a elevar a CH do solo no período de seca. No período chuvoso, há uma diluição da água do solo em superfície e, se a PST do solo for alta, há uma queda significativa da CH podendo levar ao encharcamento do solo após fortes chuvas (Shainberg et al., 1981).

A presença de autogranulação também contribui para o aumento da CH em superfície, mesmo em solos com alta PST. Mesmo quando este material superficial é submetido a pressão externa por sobrecarga, por eventual preenchimento das fendas,

apresentam CH mais alta do que a massa de solo não granulada presente na mesma profundidade (Kutílek, 1996).

### ***Expansão e contração***

Uma das características mais marcantes dos Vertissolos é a capacidade de contrair e fendilhar, quando seco, e expandir quando úmido, tornando-se muito plástico. Esta capacidade é atribuída à presença de argilas expansivas, como as esmectitas, e à alternância entre estações secas e úmidas (Ahmad, 1983).

Como resultado desse processo, os Vertissolos desenvolvem fendas profundas e largas em um padrão poligonal. Por definição, as fendas devem apresentar espessura igual ou maior que 1 cm, estendendo-se a uma profundidade mínima de 50 cm (Ahmad, 1983). No entanto, algumas fendas podem apresentar espessuras maiores que 15 cm, em superfície, e uma profundidade maior que 200 cm (Blokhuys et al., 1964).

A intensidade do fendilhamento é tão importante quanto sua espessura e profundidade, podendo ser expressa por uma relação entre o número de fissuras por unidade de área ou volume de solo. De maneira geral, observa-se uma relação inversa entre intensidade de fendilhamento e espessuras das fendas (Ahmad, 1983).

A natureza e a capacidade de expansão e contração dependem de diversos fatores, como teor e tipo de argila, proporção de argila fina e grossa, distribuição das chuvas, cátions presentes no solo, vegetação natural e uso da terra. O tipo de cátion presente entre as camadas de argilominerais 2:1 está relacionado com o tamanho das fendas. Vertissolos com argilas saturadas com Ca tendem a formar fendas pouco frequentes e largas (Smith, 1959; Sleeman, 1963) (Mermut et al., 1996a), enquanto fissuras mais frequentes e finas se formam quando há saturação por Na.

A intensidade de fendilhamento varia, também, de acordo com o clima e a distribuição de chuvas. De maneira geral, há um menor fendilhamento em áreas de clima temperado frio do que em áreas de clima tropical quente, tendo em clima mediterrâneo um fendilhamento intermediário (Mermut et al., 1996a).

O padrão de fissuração também é influenciado pelo uso da terra. Em áreas não cultivadas, com vegetação natural, o fendilhamento apresenta um padrão semi-permanente, com as rachaduras ocorrendo entre os aglomerados de vegetação (Fox, 1964b). Onde os solos são cultivados, o padrão dependeria do tipo de cultivo e do manejo

do solo (Fox, 1964b). De modo geral, nem sempre é possível observar o fendilhamento na superfície de Vertissolos cultivados, devido às práticas de aração e gradagem, no entanto, as fendas continuam presentes em subsuperfície (Mermut et al., 1996a).

### ***Desenvolvimento da estrutura***

A estrutura, uma das feições mais características dos Vertissolos, é formada de acordo com o comportamento que o solo apresenta diante dos ciclos de umedecimento e secagem (Mermut et al., 1996a). Durante o umedecimento, a água é absorvida pela argila expansiva provocando a expansão da massa de solo. À medida em que a umidade aumenta, as fissuras tornam-se menores e menos frequentes e o solo fica cada vez mais plástico e pegajoso. Por vezes, em casos extremos, apenas os *peds* maiores permanecem, apresentando uma estrutura granular muito fina em seu interior (Ahmad, 1983).

À medida que a umidade diminui, o solo se contrai e começam a ressurgir as fendas, promovendo o aparecimento de uma estrutura prismática ou em blocos angulares. O tamanho dos blocos, ou prismas, dependerá da frequência das fissuras. De modo geral, quanto mais argiloso for o solo, e quanto mais argilominerais expansivos estiverem presentes, maiores, mais profundas e menos frequentes serão as fendas e, portanto, maiores serão as unidades estruturais (Ahmad, 1983).

Com a contínua perda de umidade, as unidades estruturais, ou *peds*, secam de fora para dentro, promovendo um diferencial de umidade e volume entre a superfície e o interior da estrutura. Com isso são formadas pequenas fissuras nos *peds*, dando origem a uma estrutura secundária. Este processo também ocorre no sentido contrário, quando o solo seco é umedecido primeiramente nas paredes das fendas (Ahmad, 1983).

Na superfície do solo a desintegração dos *peds* é mais acentuada, podendo apresentar pequenas unidades prismáticas ou mesmo granulares, em uma profundidade de até 5 cm. No entanto, esta característica, denominada “autogranulação”, não é permanente, pois tende a desaparecer com o reumedecimento do solo (Ahmad, 1983).

A estrutura das camadas subsuperficiais sofre ainda influência de outros fatores, como as sobrecargas de pressão e as tensões causadas pelo aumento do peso e pela expansão da massa de solo umedecida. Com isso, é comum ocorrer a ruptura dos *peds* em

um plano de cisalhamento formando unidades estruturais com extremidades em forma de cunha (Ahmad, 1983).

O ângulo das cunhas formadas no plano de cisalhamento depende da amplitude do processo de umedecimento e secagem. Em regiões com períodos secos e úmidos mais pronunciados, as faces em cunha formam ângulos entre 20 e 30° com o eixo longitudinal. As pontas mais finas das cunhas formadas podem ainda se partir naturalmente, formando pequenas unidades estruturais triangulares ou trapezoidais achatadas, denominadas estruturas lenticulares (Krishna e Perumal, 1948), *cuneate* (Brewer, 1964), *bicuneate* (Vos e Virgo, 1969), cunhas ou paralelepípedos (Soil Survey Staff, 2010).

A ruptura dos *peds* ocorre quando a pressão causada pela expansão do Vertissolo, que varia entre 1 e 5 kg cm<sup>-2</sup> (Yong e Warkentin, 1966; Komornik e Zeitlin, 1970; Komornik, 1974), excede a sua resistência ao cisalhamento. Isto acontece principalmente quando a expansão lateral da massa do solo é limitada devido ao entupimento das fendas com material superficial. Neste caso, a pressão lateral torna-se o maior fator de estresse.

### ***Formação de slickensides***

Quando os *peds* quebram e deslizam sobre os planos de cisalhamento, ocorre a orientação da argila e o fechamento dos poros na superfície de fricção (McCormack e Wilding, 1973), formando os slickensides.

A profundidade em que os slickensides ocorrem no perfil depende, principalmente, da taxa de precipitação e da profundidade do fendilhamento (Yaalon e Kalmar, 1978). De modo geral, os slickensides são mais frequentes em Vertissolos desenvolvidos em regiões com períodos secos e úmidos mais marcantes, o que promove um fendilhamento mais profundo no solo. Fendas profundas promovem o desenvolvimento de unidades estruturais em profundidade que, por sua vez, irão sofrer maior sobrecarga da massa de solo úmida, limitando sua expansão vertical. Assim, as forças de tensão são aliviadas pelo movimento lateral, no plano de menor resistência ao cisalhamento.

O plano de cisalhamento, por sua vez, é definido pela pressão líquida, resultante das pressões laterais e de sobrecarga, e pela diferença de umidade entre duas camadas do solo (Eswaran et al., 1988).

Assim, não é comum o surgimento de slickensides nas camadas superficiais do solo, uma vez que a pressão líquida é pequena, não sendo capaz de superar a resistência ao cisalhamento do solo.

A zona de deformação real parece ser uma função da plasticidade do material subjacente no momento em que ocorre o inchaço no material sobrejacente (Eswaran et al., 1988). Como exemplo, se o material subjacente for seco ou duro, a posição desta camada determina a profundidade à qual ocorrem os resíduos de deslizamento. Se tal camada estiver próxima da superfície do solo (aproximadamente 20 cm), não ocorrerá deslizamento, pois a pressão de sobrecarga é muito baixa para exercer pressões de inchaço.

### ***Pedoturbação***

A movimentação lateral e vertical da massa de solo também promove a pedoturbação ou auto-inversão, comportamento característico dos Vertissolos, do qual, inclusive, deriva o seu nome (Oliveira, 2011). Este processo se dá pela contínua deposição do material superficial nas camadas mais profundas, por meio das fendas do solo. Em regiões com período seco prolongado, as fendas têm um caráter semipermanente, o que dá tempo suficiente para o seu total preenchimento. Assim, ao umedecer, pode ocorrer a formação do microrrelevo gilgai, pela elevação da massa de solo devido à limitação da expansão lateral. Portanto, a elevação da massa de solo está restrita à profundidade em que as fendas ocorrem, enquanto abaixo das fendas o alívio da pressão no sentido vertical é mais difícil devido à sobrecarga promovida pelas camadas superiores (Ahmad, 1983).

Este contínuo processo de soerguimento do material das camadas profundas e a incorporação do material superficial promove a “inversão” dos horizontes do solo. É estimado que seja necessário um tempo de 700 a 1250 anos para que haja uma inversão completa dos materiais de superfície e subsuperfície (Yaalon e Kalmar, 1978), no entanto, as velocidades de soerguimento do material subsuperficial e de incorporação da camada superficial são diferentes. Estima-se que em um período de dois anos, cerca de 0,08 a 0,33 % do material superficial seja incorporado nas camadas mais profundas do solo (El Abedine et al., 1971; Yaalon e Kalmar, 1978), enquanto o soerguimento do material superficial, pelo desenvolvimento do microrrelevo gilgai, possa ocorrer em até cinco anos.

A velocidade da auto-inversão das camadas do Vertissolo depende, principalmente, da capacidade de fendilhamento apresentada pelo solo. De modo geral, em solos pouco fendilhados, a inversão das camadas é mais lenta do que naqueles com fendilhamento proeminente. Este comportamento foi confirmado pela análise de radiocarbono da matéria orgânica em Vertissolos pouco fendilhados de Israel, no qual foi observado que a idade da matéria orgânica aumentava com a profundidade do solo (Yaalon e Scharpenseel, 1972; Scharpenseel e Pietig, 1973), mostrando que em Vertissolos com esta característica, a auto-inversão é muito lenta ou inexistente.

## **OCORRÊNCIA DE ESMECTITAS E CAULINITA EM VERTISSOLOS**

A composição mineralógica da fração argila tem um importante papel no entendimento do comportamento dos Vertissolos, visto que, de maneira geral, esta classe de solos apresenta textura argilosa ou muito argilosa e baixo gradiente textural ao longo do perfil (Araújo Filho et al., 2000).

Quando foi proposta a inclusão de *Grumusols* como um grande grupo da ordem Rendzina, que posteriormente deu lugar à ordem Vertisol na 7ª Aproximação da *Keys of Soil Taxonomy*, algumas características já foram pré-definidas, dentre elas, a predominância de argilas do grupo das esmectitas, como a montmorilonita (Oakes e Thorp, 1951). Entretanto, alguns trabalhos (Norrish e Pickering, 1977; Comerma, 1985; Yerima et al., 1987; Yousif et al., 1988; Marques et al., 2014) citam a presença de caulinita em quantidades proporcionais ou maiores que as esmectitas, o que pode influenciar na dinâmica de contração e expansão do solo.

As propriedades mineralógicas dos Vertissolos podem ser influenciadas por diversos fatores, como o material de origem, o clima, o relevo e o tempo de evolução do solo. A diferença entre o nível de intensidade em que estes fatores de formação atuam na evolução do solo é responsável pela grande variabilidade dos Vertissolos no mundo (Coulombe et al., 1996).

### **Esmectitas**

A formação das esmectitas está intimamente relacionada com condições de clima e relevo que proporcionem o acúmulo de sílica e bases na solução do solo, impedindo assim, sua transformação em outros tipos de argilominerais (Azevedo e Vidal-Torrado,

2009). Portanto, é mais comum que solos ricos em esmectitas ocorram em regiões com estação seca pronunciada e em locais mais abaciados do relevo.

As esmectitas mais comuns em solos são a montmorilonita, a beidelita e a nontronita, que podem ser herdadas do material de origem, principalmente folhelhos, argilitos e calcários, ser de origem neogênica, sendo precipitadas diretamente da solução do solo, ou ainda ser produto da transformação de micas, vermiculitas e cloritas máficas. Em todos os casos, sua formação ou preservação são favorecidas em pedoambientes com drenagem restrita, com suprimento de soluções ricas em Si, Al, Mg e Fe (Kämpf et al., 2009).

A alta expansividade características de solos esmectíticos causa uma série de dificuldades no manejo destes solos, assim como algumas restrições para o seu uso. Quanto ao uso agrícola, os processos de expansão e contração do solo podem causar rompimento ou amassamento das raízes, dificultando assim o crescimento das plantas. Além disso, solos com mineralogia predominantemente esmectítica possuem uma estreita faixa de umidade ótima para mecanização, apresentando alta coesão quando com baixa umidade e alta pegajosidade quando em situações de umidade do solo elevada (Azevedo e Vidal-Torrado, 2009).

A grande variação do volume dos solos esmectíticos com a variação de umidade também é de interesse geotécnico, pois provoca danos nas estruturas construídas, dificulta a trafegabilidade em estradas e a estabilidade em taludes e encostas (Maciel Filho, 1997). Além disso, materiais esmectíticos estão frequentemente associados com movimento de massa (Capra et al., 2003), que podem ocorrer de forma lenta ou em eventos catastróficos de deslizamento (Romer et al., 2002).

### **Caulinita**

A formação da caulinita é favorecida em condições de intemperismo químico elevado, levando à perda de cátions básicos e Si, diminuindo a relação molecular Ki (Si/Al). Em condições de alta temperatura, umidade e lixiviação, a caulinita pode ocorrer no solo por meio da transformação de outros minerais pré-existentes, como micas e feldspatos (Grant, 1964; Rebertus et al., 1986; Nwadialo e Lietzke, 1989), ou mesmo ser formada por neogênese, a partir de íons de Al e Si presentes na solução do solo (Melo e Wypych, 2009). A caulinita pode ainda ser herdada do material de origem, principalmente

sedimentar, em que a formação deste argilomineral se deu anteriormente ao processo de sedimentação.

Em Vertissolos, a formação de caulinita é mais comum quando estão sujeitos à maior taxa de lixiviação, favorecendo uma maior dessilicação. Outra possibilidade é quando os Vertissolos estão sob condições ácidas ou de hidromorfismo, onde muitos filossilicatos, como, por exemplo, a esmectita, estão sujeitos à dissolução, tendendo a formar um argilomineral mais estável, como a caulinita (Coulombe et al., 1996).

Vertissolos ricos em caulinita foram relatados na região central de El Salvador, desenvolvidos sobre sedimentos piroclásticos do Quaternário (Yerima et al., 1987). Os autores consideraram a caulinita e a esmectita como os principais argilominerais destes solos, mesmo apresentando alto potencial de contração e expansão e alta saturação por bases (geralmente acima de 75 %), com predomínio de Ca e Mg.

A predominância de caulinita na fração argila foi relatada para Vertissolos no Havaí (Ikawa, 1985), onde verificou que a presença deste argilomineral está relacionada com o material de origem e com a posição do solo no relevo. Na planície costeira, sob sedimentos alcalinos com baixos teores de óxidos de Fe e Mn e com quantidades apreciáveis de carbonato de cálcio, os Vertissolos apresentam predominância de montmorilonita, enquanto nas terras altas e mais ácidas houve predominância de caulinita.

São reportados ainda Vertissolos com abundância de caulinita no Sudão (Yousif et al., 1988), na Austrália (Norrish e Pickering, 1977) e na Venezuela (Comerma, 1985). No Brasil, a predominância de caulinita foi relatada em um Vertissolo do município de Juazeiro-BA, em condições de clima semiárido com precipitação média anual entre 400 e 500 mm (Silva et al., 1998). Mesmo com um alto teor de caulinita, foi observada a formação de fendas e slickensides, propriedades formadas pelo movimento de expansão e contração.

### **Relação molecular Ki**

A relação molecular Ki é um atributo referente proporção de óxidos de Si e Al proveniente das estruturas dos argilominerais do solo, podendo ser utilizado como indicativo de estágio de intemperização. Solos ricos em caulinita apresentam, geralmente,

valores de Ki inferiores próximos a 2,0 (Kämpf et al., 2012), enquanto valores maiores indicam a presença de argilominerais mais silicatados, como as esmectitas.

Os valores de Ki observados para os Vertissolos brasileiros variam geralmente entre 3,0 e 4,5 (Jacomine et al., 1971, 1972, 1975c, 1979b, 2015; Falesi, 1972; Lemos et al., 1973; Macedo, 1984; Silva et al., 1998; Corrêa et al., 2003; Kloster et al., 2013; Lima, 2014), o que pode ser relacionado com a predominância de argilominerais 2:1. De forma menos frequente, são observados valores mais elevados, como relatado para alguns Vertissolos dos municípios de Campina Grande-PB, Boqueirão-PB (Jacomine et al., 1972), Poço Redondo-SE (Jacomine et al., 1975c), Cachoerinha-PE (Lima, 2014) e Livramento-RS (Lemos et al., 1973), com Ki variando entre 4,99 e 9,82.

Valores abaixo de 3,0 não são comumente observados, embora tenham sido relatados em alguns Vertissolos do Nordeste (Jacomine et al., 1971, 1975c; Cunha et al., 2000; Marques et al., 2014) e do norte do Estado de Minas Gerais (Jacomine et al., 1979a), com valores de Ki entre 2,42 e 2,9.

Alguns destes solos estão situados em regiões de clima úmido, como nos municípios de Laranjeiras-SE, Pinhão-SE (Jacomine et al., 1975c), Terra Nova-BA (Cunha et al., 2000), e na ilha de Fernando de Noronha-PE (Marques et al., 2014), com precipitação anual média entre 1350 a 1750 mm. Os demais estão localizados em clima semiárido sob vegetação de Caatinga hiperxerófila, como nos municípios de Mossoró-RN, Açu-RN (Jacomine et al., 1971) e Manga-MG, com precipitação média entre 650 e 900 mm anuais.

Valores de Ki mais atípicos, entre 1,57 e 2,05, foram observados em um Vertissolo situado no município de Juazeiro-BA, sob clima semiárido, com precipitação anual em torno de 450 mm (Silva et al., 1998). Neste solo, a caulinita foi identificada como argilomineral predominante, embora não tenha sido explicado sua origem ou sua influência na formação das características vérticas do solo estudado.

## **GEOTECNIA DE SOLOS EXPANSIVOS**

O estudo geotécnico dos solos busca entender como estes se comportam mediante ações antrópicas, principalmente relacionadas à área de construção civil. Antes da realização de uma obra de engenharia, é imprescindível que se tenha conhecimento das

características geotécnicas dos solos, visto que estes irão dar suporte às fundações ou determinar as técnicas adequadas para realização de obras de terra.

A expansão dos centros urbanos e a crescente necessidade de construção de estradas e ferrovias tornam cada vez mais necessário que se realizem estudos voltados ao comportamento mecânico dos solos, principalmente devido à maior complexidade das obras atuais de engenharia civil. Danos às obras de engenharia devido à falta de caracterização geotécnica dos solos têm sido relatadas por todo o mundo, principalmente quando se trata de construções sobre solos expansivos (Chen, 1988; Steinberg, 1998).

As características geotécnicas inerentes a cada solo estão intimamente relacionadas com sua gênese, que por sua vez depende de fatores como material de origem, relevo e clima em que a formação do solo ocorreu. Estes fatores irão determinar as proporções granulométricas assim como a composição mineralógica dos solos, influenciando, assim, na sua consistência, capacidade de compactação, resistência ao cisalhamento e expansividade.

Deste modo, é possível observar que há uma complementação entre a pedologia e a geotecnia, portanto, um estudo de caracterização que abranja estas duas áreas pode resultar num entendimento mais profundo do comportamento dos solos.

### **Caracterização geotécnica**

No caso de solos expansivos, o estudo geotécnico visa, principalmente, o desenvolvimento de técnicas para diminuição do potencial de expansão. Tendo em vista que as técnicas devem ser aplicadas de acordo com o comportamento de cada solo, a primeira abordagem seria a realização da caracterização dos atributos geotécnicos do solo. Dentre as características mais avaliadas para este tipo de solo estão a curva de compactação e o ângulo de atrito, os limites de Atterberg e a composição granulométrica.

#### ***Curva de compactação***

A compactação do solo é uma prática comum para a construção de estradas, represas, aterros sanitários, rodovias, dentre outros (Chowdhury, 2013). No entanto, para a obtenção de melhores resultados nos processos de compactação, é necessário saber a

umidade em que se atingirá a compactação máxima, conhecida como umidade ótima de compactação ( $w_c$ ).

Solos compactados com umidade abaixo da  $w_c$  tendem a apresentar maior resistência à deformação dos agregados, gerando assim maior espaço poroso e, conseqüentemente, diminuindo a densidade do solo. Por outro lado, uma umidade acima da  $w_c$ , promove menor coesão da argila (Delage et al., 1996), fazendo com que o solo apresente um comportamento menos sólido e mais fluido, limitando a sua compactação.

A umidade ótima para compactação de solos expansivos é bastante variável. Estudos de compactação deste tipo de solo (Gan et al., 1988; Simões de Oliveira et al., 2006; Ene e Okagbue, 2009; Chowdhury, 2013), relatam umidade variando entre 16 e 25 % (massa/massa), estando, geralmente, um pouco abaixo do limite de plasticidade (LP). De modo geral, as massas específicas dos solos compactados ( $\gamma_c$ ) observada por estes autores não foram altas, variando entre 1,25 e 1,82 g cm<sup>-3</sup>.

Em um dos trabalhos citados (Simões de Oliveira et al., 2006) os autores realizaram um levantamento de dados de  $w_c$  e  $\gamma_c$  de diversos Vertissolos do Recôncavo Baiano, nos municípios de São Francisco do Conde, Candeias, Santo Amaro da Purificação e Simões Filho. Apenas as médias dos resultados foi apresentada pelos autores, resultando em uma  $w_c$  em torno de 25 %, considerada como alta, e uma  $\gamma_c$  1,42 g cm<sup>-3</sup>. Os autores observaram ainda que as curvas de compactação eram “abertas”, o que seria esperado para solos como comportamento expansivo.

### *Ângulo de atrito*

O ângulo de atrito ( $\phi$ ) do solo não compactado depende principalmente da granulometria, do tipo de argilomineral presente e da umidade em que o solo se encontra (Chowdhury, 2013). Comumente, solos mais arenosos ou cascalhentos tendem a ter um maior  $\phi$ , devido à maior rugosidade da superfície de fricção. A presença de argilominerais expansivos, por outro lado, contribui para um menor  $\phi$ , principalmente em umidade elevada, em que há uma baixa coesão entre as partículas do solo. De modo geral, materiais compostos por areia e cascalho apresentam  $\phi$  entre 34° a 48°, só por areia, entre 30° e 45° e por argila, cerca de 20° (Palossy et al., 1993).

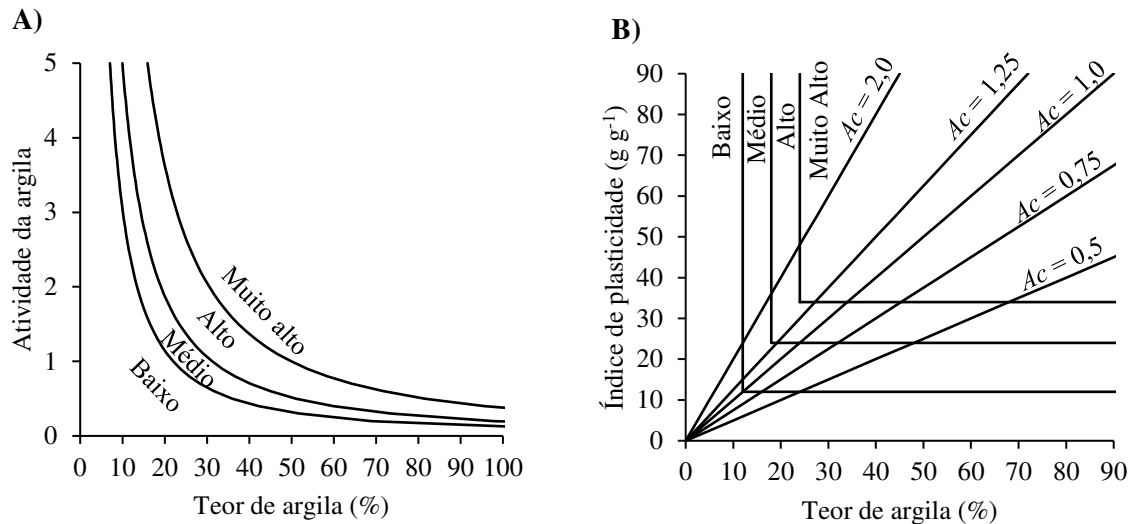
Solos expansivos têm, geralmente, alto teor de argila do tipo 2:1, portanto, a coesão (c) das partículas de argila destes solos muda drasticamente com a mudança de umidade, indo de muito coeso, quando seco, a muito pouco coeso quando saturado. As argilas apresentam frequentemente coesão entre 10 e 20 kPa, no entanto, dependendo do tipo de argila, pode variar entre 0 e 766 kPa (Chowdhury, 2013).

Vários trabalhos têm buscado determinar o  $\phi$  e a coesão de diversos solos expansivos ao redor do mundo. Muitos deles (Gan et al., 1988; Shanker e Maruthi, 1989; Kong e Tan, 2000; Taha et al., 2000; Miao et al., 2002; Cokca et al., 2004; Rahardjo et al., 2004; Heping et al., 2005; Ye et al., 2010) também buscaram caracterizar estes atributos em condição não saturada, no entanto, a saturação é a condição mais crítica, devido à baixa coesão (Lucian, 2008; Ye et al., 2010; Chowdhury, 2013). Este comportamento foi verificado em um solo expansivo no Canadá, em que o fator de segurança de estabilidade de taludes de 45° abaixou para 24 % na condição de saturação (Chowdhury, 2013).

### ***Limites de Atterberg e granulometria***

Como parte da caracterização geotécnica, são usualmente apresentados os limites de Atterberg e a granulometria do solo, visto que estes fatores estão intimamente relacionados entre si e entre as outras características geotécnicas, auxiliando, portanto, na interpretação dos resultados. De modo geral, os solos expansivos citados na literatura apresentaram majoritariamente teores de argila superiores a 50 %, o que certamente influencia na capacidade expansiva. Além do teor, o tipo de argila é um importante fator, podendo tornar um solo expansivo mesmo em baixa quantidade, como abaixo de 25 % (Simões de Oliveira et al., 2006).

Os limites de Atterberg são propriedades bastante utilizadas para entender e prever o comportamento dos solos expansivos. Existem diversas cartas que fazem correlações entre os valores dos limites com outros atributos, como índice de plasticidade e atividade da argila, buscando avaliar e classificar os solos expansivos. Como exemplo, pode-se citar as cartas de Seed et al. (1962) (Figura 4A) e Carter e Bentley (1991) (Figura 4B).



**Figura 4.** Cartas de classificação do potencial de expansão do solo propostas por **A)** Seed et al. (1962) e **B)** Carter e Bentley (1991) ( $A_c$  = atividade da argila).

A atividade da argila e o índice de plasticidade são atributos que dependem da capacidade de absorção de água da argila, sendo maiores quando há predominância de argilominerais expansivos. Porém, ao observar as cartas citadas (Figura 4A,B), nota-se que o potencial de expansão do solo não é exclusivamente dependente da expansividade da argila, mas também do teor de argila presente. Em ambas as cartas, solos com argila de baixa atividade ( $<0,5$ ) podem apresentar alta expansividade, desde que tenha teores de argila superiores a 50 %.

### Fatores físicos e químicos que influenciam no comportamento geotécnico

Como abordado anteriormente, o comportamento expansivo está intimamente relacionado com a mineralogia e a granulometria do solo. A presença de argilas expansivas, como as esmectitas, é a principal razão da expansão do solo, principalmente quando em grandes quantidades. Geralmente, os minerais expansivos do solo estão presentes na fração argila, portanto, um maior teor de areia e cascalho no solo pode contribuir para a atenuação do processo de expansão.

As argilas se expandem devido à hidratação dos cátions presentes nas suas entrecamadas, dependendo, portanto, do tamanho do raio hidratado destes cátions (Nelson et al., 2015). Assim, o tipo de cátion presente vai provocar comportamentos de expansão e contração distintos, como pode-se observar em Vertissolos com altos teores de Ca ou de Na. Vertissolos com Ca nas entrecamadas das argilas apresentam fendas mais

estreitas e menos espaçadas (Smith, 1959; Sleeman, 1963), enquanto os com altos teores de Na apresentam fendas mais largas e mais espaçadas (Mermut et al., 1996c). Isto ocorre porque o Na tem um raio hidratado maior do que o Ca, o que provoca uma maior expansão das entrecamadas. Além disso, o Na é monovalente, o que implica na adsorção de um maior número de íons para a neutralização das cargas negativas das argilas (Nelson et al., 2015).

A partir do momento em que a mineralogia, a granulometria e o tipo de cátion presente influenciam no potencial expansivo do solo, outras propriedades geotécnicas também são influenciadas. Como discutido, a expansão da argila se dá pela hidratação dos cátions presentes nas entrecamadas, portanto, uma argila com maior potencial expansivo absorve mais água do que uma com um potencial baixo. Por este motivo, argilas expansivas apresentam maiores limites de liquidez e de plasticidade do que as não expansivas.

Solos ricos em argilas expansivas, como os Vertissolos, apresentam extrema dureza quando secos e alta plasticidade e pegajosidade quando úmidos, o que influencia na densidade máxima de compactação. Em solos não expansivos, a compactação máxima ocorre quando a resistência à deformação dos agregados é diminuída pela adição de água, permitindo que, com os impactos, a massa do solo se deforme e diminua sua porosidade. Ao adicionar mais água, as partículas do solo vão perdendo a coesão e começam a se comportar como um fluido. Neste momento, as partículas não “colam” mais umas nas outras e os poros, que deveriam ser diminuídos, começam a ficar ocupados com água, resultando numa menor capacidade de compactação do solo.

Em solos expansivos, este processo ocorre de forma um pouco diferente. Ao mesmo tempo em que a adição de água diminui a resistência à deformação dos agregados, hidrata os íons das entrecamadas causando a expansão da argila. Como resultado, há um aumento mais lento da densidade de compactação antes de se atingir a umidade ótima. Como as argilas expansivas apresentam um maior limite de plasticidade do que as não expansivas, é necessário a adição de um volume maior de água para provocar a perda de coesão entre as partículas do solo. Isto implica numa redução mais lenta da densidade de compactação em função da adição de água. Assim, as curvas de compactação dos solos expansivos tendem a ser mais abertas do que as de solos não expansivos (Simões de Oliveira et al., 2006).

O tipo de argila e a distribuição granulométrica das partículas do solo também influenciam no ângulo de atrito interno. Como comentado no tópico anterior, partículas mais grosseiras geram mais atrito entre as superfícies de fricção, dificultando o cisalhamento. Materiais argilosos tendem a apresentar um menor ângulo de atrito quando saturados, o que é mais evidente com a presença de argilominerais expansivos (Chowdhury, 2013). Isto ocorre porque a saturação diminui muito a coesão entre as partículas do solo, tornando-o mais susceptível ao cisalhamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acquaye DK, Dowuona GN, Mermut AR, St. Arnaud RJ. Micromorphology and Mineralogy of Cracking Soils from the Accra Plains of Ghana. *Soil Sci Soc Am J. Madison, WI: Soil Science Society of America; 1992;56:193–201.*
- Ahmad N. Vertisols. In: Wilding LP, Smeck NE, Hall GF, organizadores. *Pedogenes Soil Taxon II Soil Orders Dev Soil Sci 11B. Amsterdam: Elsevier; 1983. p. 91–123.*
- Ahmad N. Acid Vertisols. *Fifth Soil Classif Work. Khartoum: Soil Survey Administration; 1985. p. 141–151.*
- Ahmad N, Jones RL. Genesis, chemical properties and mineralogy of Caribbean grumusols. *Soil Sci. 1969a;107:166–174.*
- Ahmad N, Jones RL. Genesis, chemical properties and mineralogy of limestone derived soils, Barbados, West Indies. *Trop Agric. 1969b;46:1–15.*
- Araújo Filho JC, Gomes EC, Silva FHBB, Oliveira Neto MB, Parahyba RB V., Cunha TJJ, Cavalcanti AC, Santos JCP, Silva AB, Lopes OF, Leite AP, Silva MSL, Ribeiro Filho MR, Acciolly LJO, Marques AD, Amaral AJ, Lima PC. *Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade do Estado de Alagoas. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2012. p. 238.*
- Araújo Filho JC de, Burgos N, Lopes OF, Silva FHBB da, Medeiros LAR, Melo Filho HFR de, Parahyba R da BV, Cavalcanti AC, Oliveira Neto MB de, Silva FBR e, Leite AP, Santos JCP dos, Sousa Neto NC de, Silva AB da, Luz LRQP da, Lima PC de, Reis RMG. *Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco. Recife: Embrapa Solos; 2000. p. 382.*
- Araújo Filho JC de, Lopes OF, Oliveira Neto MB de, Nogueira LRQ, Barreto AC. *Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da região dos tabuleiros costeiros e da baixada litorânea do Estado de Sergipe. Recife: Embrapa; 1999. p. 98.*
- Azevedo AC, Vidal-Torrado P. Esmectita, vermiculita, minerais com hidróxi entre camadas e clorita. In: Melo VF, Alleoni LRF, organizadores. *Mineral e química do solo Parte I – conceitos básicos. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2009. p. 381–426.*
- Bal VD. Some aspects of the black cotton soils of the Central Provinces. *Trans Third Int Congr Soil Sci. 1935;3:154–158.*
- Bardales NG. *Gênese, morfologia e classificação de solos do baixo vale do rio Iaco, Acre, Brasil. Universidade Federal de Viçosa; 2005.*
- Berndt RD, Coughlan RJ. The nature of changes in bulk density with water in a cracking clay. *Aust J Soil Res. 1977;15:27–37.*
- Blokhuis WA. Morphology and genesis of Vertisols. *Trans 12th Int Congr soil Sci. New Delhi;*

1982. p. 23–47.

- Blokhuis WA, Ochtman LHS, Peters KH. Vertisols in the Gezira and Khashm el Girba clay plains, Sudan. *Trans Eighth Int Congr Soil Sci. Bucharest; 1964.* p. 591–601.
- Brewer R. *Fabric and Mineral Analysis of Soil.* New York: John Wiley and Sons; 1964.
- Brown CB, Bally GS. *Land capability survey of Trinidad and Tobago: soils of central and south Trinidad.* Trinidad: Government Printer; 1968.
- Capra LJ, Lugo-Hub P, Borselli L. Mass movement in tropical volcanic terrains: The case of Teziutlan (Mexico). *Eng Geol.* 2003;69:359–379.
- Carter M, Bentley SP. *Correlations of soil properties.* London: Pentech Press; 1991.
- Chen FH. *Foundations on expansive soils.* Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company; 1988.
- Chowdhury RH. *Shear strength properties of compacted expansive soils.* University of Regina; 2013.
- Cokca E, Erol O, Armangil F. Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay. *Geotech Geol Eng.* 2004;22:285–297.
- Comerma JA. Vertisols of Venezuela. *Proc 5th Int Soil Classif Work.* Khartoum: Soil Survey Administration; 1985. p. 153–161.
- Compton E. Soil formation. *Sel Pap soil Form Classif.* Soil Science Society of America, Special Publication Series 1; 1967.
- Corey AT. *Mechanics of Heterogeneous Fluids in Porous Media.* Fort Collins: Water Resources Publications; 1977.
- Corrêa MM, Ker JC, Mendonça ES, Ruiz HA, Bastos RS. Atributos físicos químicos e mineralógicos de solos da região das várzeas de Sousa. *Rev Bras Ciência do Solo.* 2003;27:311–324.
- Correa VHC, Ramos P. A precariedade do transporte rodoviário brasileiro para o escoamento da produção de soja do Centro-Oeste: situação e perspectivas. *Rev Econ e Sociol Rural.* 2010;48:447–472.
- Coughlan KJ, Fox WE, Hughes JD. Aggregation in swelling clay soils. *Aust J Soil Res.* 1973;11:133–141.
- Coulombe CE, Dixon JB, Wilding LP. Mineralogy and chemistry of Vertisols. In: Ahmad N, Mermut AR, organizadores. *Vertisols Technol their Manag Dev soil Sci 24.* Amsterdam: Elsevier Science; 1996. p. 115–200.
- Cunha TJF, Ribeiro LP, Santos HG dos, Gomes IA, Santos RD dos. *Estudo de correlação de solos para fins de classificação nas regiões do Recôncavo Baiano e microrregião de Irecê-Bahia.* Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2000. p. 59.
- Dalton de Souza J, Kosin M, Melo RC, Santos RA, Teixeira LR, Sampaio AR, Guimarães JT, Vieira Bento R, Borges VP, Martins AAM, Arcaño JB, Loureiro HSC, Angelim LAA. *Mapa geológico do Estado da Bahia - escala 1:1.000.000.* Salvador: CBPM, CPRM; 2003.
- Dasog GS, Acton DF, Mermut AR. Genesis and Classification of Clay Soils with Vertic Properties in Saskatchewan. *Soil Sci Soc Am J. Soil Science Society of America;* 1987;51:1243.
- Delage P, Audiguier M, Cui YJ, Howat MD. Microstructure of a compacted silt. *Can Geotech J.* 1996;33:50–158.
- Duchaufour P. *Pedologie: Pedogenese et classification.* Paris: Masson; 1977.
- Duchaufour P, Dommergues Y. A study of the humic compounds of some tropical and sub-tropical

- soils. *African Soils*. 1963;8:5–39.
- Dudal R. Dark clay soils of tropical and subtropical regions (Agricultural Development Paper 83). Rome: FAO - Agriculture Development Paper; 1965.
- Dudas MJ, Pawluk S. Naturally occurring organo-clay complexes of orthic black chernozems. *Geoderma*. 1969;3:5–17.
- El Abedine AZ, Robinson GH, Commissaris A. Approximate age of the Vertisols of Gezira, Central Clay Plain, Sudan. *Soil Sci*. 1971;111:200–207.
- Ene E, Okagbue C. Some basic geotechnical properties of expansive soil modified using pyroclastic dust. *Eng Geol*. 2009;107:61–65.
- Eswaran H, Kimble J, Cook T. Properties, genesis and classification of Vertisols. In: Hirekur LR, Seghal JL, Pal DK, Deshpande SB, organizadores. *Classif Manag Use Potential Swell-Shrink Soils*. Nagpur; 1988. p. 1–22.
- Fadl OAA, Ali MA. Irrigation of a saline-sodic site in the Sudan Gezira, I: Water movement. *Trop Agric*. 1977;54:157–165.
- Falesi IC. Solos da rodovia Transamazônica. Belém: Ministério da Agricultura, Instituto de Pesquisa Agropecuária do Norte; 1972. p. 212.
- FAO. Reconocimientos edafológicos exploratórios, Ecuador. Informe FAO/PAAT 585. FAO; 1957. p. 40.
- FAO. Report on the soil survey project of British Guiana, vols. III and IV. Rome: FAO; 1966.
- Fox WE. A study of bulk density and water in a swelling soil. *Soil Sci*. 1964a;98:307–316.
- Fox WE. Cracking characteristics and field capacity in a swelling soil. *Soil Sci*. 1964b;98:413.
- Freebairn DM, Wockner GH. A study of soil erosion on Vertisols of the Eastern Darling Downs, Queensland. 1. Effects of surface conditions on soil movement within contour bay catchments. *Aust J Soil Res*. 1986;24:165–179.
- Gan JKM, Fredlund DG, Rahardjo H. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Can Geotech J*. 1988;25:500–510.
- Grant WH. Chemical weathering of biotite-plagioclase gneiss. *Clays Clay Miner*. 1964;12:455–463.
- Haines WB. The volume changes associated with variations of water content in soil. *J Agric Sci*. 1923;13:293–310.
- Heping Y, Yongxin Q, Jianlong Z. New development in studies on Ningming expansive soils. *Chinese J Geotech Eng*. 2005;27:981–987.
- Hoskin JS. A comparative study of the black earths of Australia and the regur of India. *Trans R Soc South Aust*. 1935;59:168–200.
- IBGE. Mapa de biomas do Brasil, primeira aproximação - escala 1:5.000.000. Brasília: Instituto Brasileiro de geografia e Estatística, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Ministério do Meio Ambiente; 2004.
- Ikawa H. Vertisols of Hawaii. Proc 5th Int Soil Classif Work. Khartoum: Soil Survey Administration; 1985. p. 125–139.
- Iwata S, Tabuchi T, Warkentin BP. Soil-water interactions: mechanisms and applications. New York: Marcel Dekker; 1988.
- Jacomine PKT, Araújo Filho JC de, Dantas JA, Souza Júnior VS de, Martins CM, Sobrinho FE, Freitas DF. Guia de excursão pedológica. XXXV Congr Bras Ciência do Solo. Natal: Embrapa Solos; 2015. p. 67.

- Jacomine PKT, Cavalcanti AC, Formiga RA, Silva FBR e, Burgos N, Medeiros LAR, Lopes OF, Filho HFR de M, Pessoa SCP, Lima PC de. Levantamento exploratório - reconhecimento dos solos do Norte de Minas Gerais. Recife: Embrapa; 1979a. p. 426.
- Jacomine PKT, Cavalcanti AC, Formiga RA, Silva FBR e, Burgos N, Medeiros LAR, Lopes OF, Mélo Filho HFR de, Pessoa SCP, Lima PC de. Levantamento de reconhecimento com detalhes dos solos do distrito agroindustrial de Jaíba - Minas Gerais. Recife: Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais - EPAMIG, Fundação Rural Mineira - Colonização e Desenvolvimento Agrário - RURALMINAS, Escola Superior de Agricultura de Lavras - ESAL; 1975a.
- Jacomine PKT, Cavalcanti AC, Pessoa SCP, Silveira CO da. Ministério do interior levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado de Alagoas. Recife: Embrapa, Centro de Pesquisas Pedológicas; 1975b. p. 572.
- Jacomine PKT, Cavalcanti AC, Silva FBR e, Montenegro JO, Formiga RA, de Mélo Filho HFR. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos da margem direita do rio São Francisco; Estado da Bahia (vol. 2). Recife: Embrapa, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos; 1979b. p. 549.
- Jacomine PKT, Montenegro JO, Ribeiro MR, Formiga RA. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado de Sergipe. Recife: Embrapa, Centro de Pesquisas Pedológicas; 1975c. p. 544.
- Jacomine PKT, Ribeiro MR, Montenegro JO, Silva AP da, Melo Filho HFR de. Levantamento exploratório e reconhecimento dos solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, SUDENE; 1972. p. 686.
- Jacomine PKT, Silva FBR e, Formiga RA, Almeida JC, Beltrão V de A, Pessoa SCP, Ferreira RC. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte. Recife: Divisão de Pesquisa Pedológica DNPEA, Ministério da Agricultura; Série Pedologia, 9, Divisão de Agrologia, DRN-SUDENE, Ministério do Interior; 1971. p. 536.
- Kaloga B. Upper, Pedological study of the slopes of the white and red Volta basins in Volta, II. The Vertisols. Cah ORSTOM Série Pédologie. 1966;4:29–61.
- Kämpf N, Curi N, Marques JJ. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: Melo VF, Alleoni LRF, organizadores. Mineral e química do solo Parte I – conceitos básicos. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2009. p. 333–379.
- Kämpf N, Marques JJ, Curi N. Mineralogia de solos brasileiros: principais aspectos. In: Ker JC, Curi N, Schaefer CEGR, Vidal-Torrado P, organizadores. Pedol Fundam. 1ª edição. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2012. p. 81–146.
- Kloster AC, Melo AWF de, Schaefer CEGR, Masutti CSM, Salimon CI, Oliveira CV de, Araújo EA de, Amaral EF do, Amaral EF do, Costa F de S, Oliveira H de. Guia de campo da IX reunião brasileira de classificação e correlação de solos: solos sedimentares em sistemas amazônicos - potencialidades e demandas de pesquisa. IX Reun Bras Classif e correlação solo. Brasília: Embrapa; 2013. p. 206.
- Komornik A. General report. Proc Third Int Conf Expans Soils. 1974;2:177–181.
- Komornik A, Zeitlin JG. Laboratory determination of lateral and vertical stresses in compacted swelling clay. J Mater. 1970;5:108–128.
- Kong LW, Tan LR. Study on shear strength and swelling-shrinkage characteristic of compacted expansive soil. Unsaturated soils Asia Proc Asian Conf Unsaturated Soils, UNSAT-ASIA 2000. Singapore; 2000. p. 515–519.
- Krishna P. G, Perumal S. Structure in black cotton soils of Nisamsagar project area. Hyderabad, India. Soil Sci. 1948;66:29–38.
- Kunze GW, Oakes H, Bloodworth ME. Grumusols of the Coast Prairie of Texas. Soil Sci. Soil

- Science Society of America; 1963;27:412–421.
- Kutílek M. Non-Darcian flow of water in soils—laminar region. In: *Fundam Transp Phenom porous media*. Amsterdam: Elsevier; 1972. p. 327–340.
- Kutílek M. Soil physical properties of saline and alkali Vertisols. *Isot Radiat Tech soil Phys Irrig Stud*. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1983. p. 179–190.
- Kutílek M. Water relations and water management of Vertisols. In: Ahmad N, Mermut AR, organizadores. *Vertisols Technol their Manag Dev soil Sci 24*. Amsterdam: Elsevier Science; 1996. p. 201–230.
- Legros J-P. Vertisols. In: Legros J-P, organizador. *Major Soil Groups World Ecol Genesis, Prop Classif*. Boca Raton: CRC Press; 2012. p. 180–205.
- Lemos RC, Azolim MAD, Abrão PUR, Santos MCL dos. Reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife: Ministério da Agricultura, SUDENE; 1973. p. 482.
- Lima GK. Caracterização dos Vertissolos do Nordeste brasileiro. Universidade Federal Rural de Pernambuco; 2014.
- Little LP, Ringrose-Voase AJ, Ward WT. Surface structure in grey clays of North western New South Wales in relation to micromorphology, cation suite and particle size attributes. *Aust J Soil Res*. 1992;30:1–16.
- Lucian C. Geotechnical aspects of buildings on expansive soils in Kibaha, Tanzania. Royal Institute of Technology; 2008.
- Macedo W. Levantamento e reconhecimento de solos do município de Bagé. Brasília: Embrapa - UEPAE; 1984. p. 66.
- Maciel Filho CL. Introdução à geologia de engenharia. Santa Maria: UFSM/CPRM; 1997.
- Marques FA, Souza RA da S, Souza JES de, Lima JFWF, Souza Junior VS de. Caracterização e classificação de Vertissolos da Ilha de Fernando de Noronha (PE). *Rev Bras Ciência do Solo*. 2014;38:1051–1065.
- McCormack DE, Wilding LP. Proposed origin of latisseplic fabric. In: Rutherford GK, organizador. *Soil Microsc Fourth Int Work Meet Soil Micromorphol*. Kingston: The Limestone Press; 1973. p. 761–771.
- Melo VF, Wypych F. Caulinita e haloisita. In: Melo VF, Alleoni LRF, organizadores. *Mineral e química do solo Parte I – conceitos básicos*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2009. p. 427–504.
- Mermut AR, Acton DF. Surficial rearrangement and cracking in swelling clay soils of the glacial lake Regina basin in Saskatchewan. *Can J Soil Sci*. NRC Research Press Ottawa, Canada; 1985;65:317–327.
- Mermut AR, Dasog GS, Dowuona GN. Soil morphology. In: Ahmad N, Mermut A, organizadores. *Vertisols Technol their Manag Dev soil Sci 24*. Amsterdam: Elsevier Science; 1996a. p. 89–114.
- Mermut AR, Patterson DD, Mcdaniel PA. Cold Vertisols and their management. In: Ahmad N, Mermut A, organizadores. *Vertisols Technol their Manag Dev soil Sci 24*. Amsterdam: Elsevier Science; 1996b. p. 479–497.
- Mermut AR, Patterson DD, McDaniel PA. Pedogenesis. In: Ahmad N, Mermut A, organizadores. *Vertisols Technol their Manag Dev soil Sci 24*. Amsterdam: Elsevier Science; 1996c. p. 43–62.
- Miao L, Liu S, Lai Y. Research of soil–water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil. *Eng Geol*. 2002;55:261–267.
- Mohr C, Baren F Van, Schuylenborgh J van. Tropical soils. A comprehensive study of their

- genesis. The Hague: Mouton-Ichtiar Baru-Van Hoeve; 1972.
- Mothci EP, Freitas FG de, Palmieri F, Rodrigues TE. Guia de excursão de estudo de solos no Estado do Rio de Janeiro. An da I Reun Classif correlação e Interpret aptidão agrícola solos. Rio de Janeiro: Embrapa; 1979. p. 77–273.
- Nelson JD, Chao KC, Overton DD, Nelson EJ. Foundation engineering for expansive soils. New Jersey: John Wiley & Sons; 2015.
- Nordt LC, Wilding LP, Lynn WC, Crawford CC. Vertisol genesis in a humid climate of the coastal plain of Texas, U.S.A. *Geoderma*. 2004;122:83–102.
- Norrish K, Pickering JG. Clay mineralogic properties. In: Russell JS, Greacen EL, organizadores. Soil Factors Crop Prod a Semi-arid Environ. St Lucia: University of Queensland Press; 1977. p. 33–53.
- Nwadialo BE, Lietzke DA. Mineralogy and weathering of soils in Tennessee Copper basin. *Soil Sci*. 1989;147:162–173.
- Oakes H, Thorp J. Dark-clay Soils of Warm Regions Variously Called Rendzina, Black Cotton Soils, Regur, and Tirs. *Soil Sci Soc Am J*. Soil Science Society of America; 1951;15:347.
- Oliveira JB de. *Pedologia Aplicada*. Piracicaba: FEALQ; 2011.
- Oliveira JB de, Jacomine PKT, Camargo MN. *Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu conhecimento*. 2º ed. Jboticabal: FUNEP; 1992.
- Palossy L, Scharle P, Szalatky I. *Earth walls*. New York: Ellis Horwood; 1993.
- Parsons RB, Moncharoan L, Knox EG. Geomorphic occurrence of Peloxererts, Willamette Valley, Oregon. *Soil Sci Soc Am J Proc*. 1973;37:924–927.
- Pillai-McGarry UPP, Collis-George N. Laboratory simulation of the surface morphology of self-mulching and non self-mulching Vertisols. II. Quantification of visual features. *Aust J Soil Res*. 1990;28:129–139.
- Podwojewski P. Signification pédologique et paléoclimatique de la présence de gypse dans des vertisols de la côte ouest de l'île de Malekula (Vanuatu). *Comptes-Rendus l'Académie des Sci Paris Série 2 Mécanique*. 1994;319:111–117.
- Podwojewski P. The occurrence and interpretation of carbonate and sulfate minerals in a sequence of Vertisols in New Caledonia. *Geoderma*. 1995;65:223–248.
- Quantin P. Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu) : étude de la pédogenèse initiale en milieu tropical. Editions de l'ORSTOM; 1992.
- Rahardjo H, Aung K., Leong E., Rezaur R. Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. *Eng Geol*. 2004;73:157–169.
- Raychaudhuri SP, Roy BB, Gupta SP. Black soils of India. *Natl Inst Sci India*. 1963;3:1–47.
- Raymundo ME. *The properties of the black earths of Hawaii*. University of Hawaii; 1965.
- Rebertus RA, Weed SB, Buol SW. Transformations of biotite to kaolinite during saprolite-soil weathering. *Soil Sci Soc Am J*. 1986;50:810–819.
- Romer W, Kanig M, Pfisterer U. The influence of lithology and hillslope development in the area of the Jacupiranga Alkaline Complex and its surrounding (São Paulo, Brazil). *Catena*. 2002;47:151–173.
- Scharpenseel HW, Pietig F. University of Bonn natural radio-carbon measurements V. *Radiocarbon*. 1973;15:13–44.
- Seed HB, Woodward Jr. RJ, Lundgren R. Prediction of swelling potential for compacted clays. *J Soil Mech Found Div*. 1962;88:53–88.

- Shainberg I, Rhoades JD, Prather JR. Effect of low concentration on clay dispersion and hydraulic conductivity of a sodic soil. *Soil Sci Soc Am J*. 1981;45:273–277.
- Shanker NB, Maruthi G. Use of lime-soil piles for in-situ stabilization of black cotton soils. *Proc Indian Geotech Conf vol 1*. Meerut; 1989. p. 149–153.
- Silva FBR e, Santos JCP dos, Araújo Filho JC de, Gomes IA, Santos RD dos. V reunião de cassificação, correlação e aplicação de levantamento de solos. Rio de Janeiro: Embrapa - CNPS; 1998. p. 129.
- Simões de Oliveira AG, Jesus AC, Miranda SB. Estudo geológico geotécnico dos solos expansivos da região do Recôncavo Baiano. II Simpósio Bras Jovens Geotécnicos - II Geojovem. Nova Friburgo; 2006.
- Simonson RW. Morphology and classification of the regur soils of India. *J Soil Sci*. Blackwell Publishing Ltd; 1954;5:275–288.
- Singh S, Singh PK. A comparative study of humic acids separated from some black soils of India. *Proc Natl Acad Sci India*. 1960;29A:378–381.
- Sleeman JR. Cracks, peds, and their surfaces in some soils of the riverine plain,. *Aust J Soil Res*. 1963;1:91–102.
- Smiles DE, Rosenthal J. The movement of water in swelling materials. *Aust J Soil Res*. 1968;6:237–248.
- Smith RM. Some structural relationships of Texas Blackland soils, with special attention to shrinkage and swelling. Agricultural Research Service, United States Dept. of Agriculture; 1959.
- Soil Survey Staff. *Keys to Soil Taxonomy*. 11° ed. Change. Raleigh: United States Department of Agriculture - USDA, Natural Resources Conservation Service - NRCS; 2010.
- Spera ST, Cardoso EL, Macedo JA de. Sugestão para o uso e manejo de Vertissolos nos projetos da região não inundável da Corumbá, MS. Circular Técnica N° 20. Corumbá: Embrapa-CPAP; 1993.
- Stace HCT, Hubble GD, Brewer R, Northcote KH, Sleeman JR, Mulcahy MJ, Hallsworth EG. *A handbook of Australian soils*. Glenside: Rellim Technical Publication; 1968.
- Steinberg ML. *Geomembranes and the control of expansive soils*. New York: McGraw-Hill; 1998.
- Taha MR, Hossain MK, Mofiz SA. Behaviour and modeling of granite residual soil in direct shear test. *J Inst Eng Malaysia*. 2000;61:27–40.
- Thompson CH, Beckmann GG. Gilgai in Australian black earths and some of its effects on plants. *Trop Agric*. 1982;59:149–156.
- Van Der Merwe CR. Sub-tropical black clays. *Trans Fourth Int Congr Soil Sci*. 1950. p. 191–193.
- Van Olphen H. *An introduction to clay colloid chemistry*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 1977.
- Vieira SL, Oliveira NV de C e, Bastos TX. *Os solos do Estado do Pará*. Belém: Instituto do Desenvolvimento Econômico-Social do Pará - IDES; 1971.
- Vos JHNC, Virgo KJ. Soil structure in Vertisols of the Blue Nile clay plains, Sudan. *J Soil Sci*. 1969;20:189–206.
- Wilding LP, Tessier D. Genesis of Vertisols: shrink-swell phenomena. In: Wilding LP, Puentes R, organizadores. *Vertisols their Distrib Prop Classif Manag*. College Station: Texas A & M University Printing Services; 1988. p. 55–82.
- Wilding LP, Williams D, Miller W, Cook T, Eswaran H. Close interval spatial variability of

- Vertisols: a case study in Texas. In: Kimble JM, organizador. Proc Sixth Int Soil Correl Meet. Soil Conservation Service - SCS, United States Department of Agriculture - USDA; 1991. p. 232–247.
- Yaalon DH. Soil-forming processes in time and space. In: Yaalon DH, organizador. Paleopedology. Jerusalem: International Society of Soil Science and Israel University Press; 1971. p. 29–39.
- Yaalon DH, Kalmar D. Dynamics of cracking and swelling clay soils: displacement of skeletal grains, optimum depth of slickensides and rate of intra-pedonic turbation. *Earth Surf Process.* 1978;3:31–42.
- Yaalon DH, Scharpenseel HW. Radio-carbon dating of soil organic matter in Israel soils. *Isr J Agric Res.* 1972;22:154–155.
- Ye W, Zhang Y, Chen B, Zhou X, Xie Q. Shear strength of an unsaturated weakly expansive soil. *J Rock Mech Geotech Eng.* 2010;2:155–161.
- Yerima BPK, Wilding LP, Calhoun FG, Hallmark CT. Volcanic ash-influenced Vertisols and associated Mollisols of El Salvador: physical, chemical, and morphological properties. *Soil Sci Soc Am J.* 1987;51:699.
- Yong RN, Warkentin BP. *Introduction to Soil Behavior.* New York: Macmillan; 1966.
- Young A. *Tropical soils and soil survey.* London: Cambridge University Press; 1976.
- Yousif AA, Mohamed HHA, Ericsson T. Clay and iron minerals in soils of the clay plains of Central Sudan. *J Soil Sci.* 1988;39:539–548.
- Yule DF, Ritchie JT. Soil shrinkage relationship of Texas Vertisols: I. Small cores. *Soil Sci Soc Am J.* 1980a;44:1285–1291.
- Yule DF, Ritchie JT. Soil shrinkage relationships of Texas Vertisols: I. small cores. *Soil Sci Soc Am J.* Madison, WI: Soil Science Society of America; 1980b;44:1285–1291.

## Capítulo 1

# GÊNESE DE VERTISSOLOS DO ESTADO DA BAHIA

### RESUMO

Comportamentos atípicos quanto à gênese de Vertissolos foram observadas em duas áreas distintas do Estado da Bahia, no Nordeste brasileiro. No município de Juazeiro, na região Semiárida, há a ocorrência de Vertissolos com mineralogia predominantemente caulínica, enquanto na região do Recôncavo os Vertissolos ocorrem em clima úmido e relevo acidentado. Deste modo, o presente estudo teve como objetivo investigar os motivos destas ocorrências, assim como entender como os fatores de formação atuam nestes solos. Para isso, foram selecionados três perfis de Vertissolo na região Semiárida e três na região do Recôncavo, nos quais foram realizadas caracterizações morfológicas, químicas, físicas e mineralógicas. Observou-se, para a região semiárida, que os Vertissolos são mais intemperizados quando próximos ao rio São Francisco. O perfil mais próximo ao rio São Francisco apresentou estágio de intemperismo mais avançado do que o esperado para Vertissolos, o que está provavelmente relacionado com o aporte de material previamente intemperizados. Os baixos teores de argilominerais 2:1 observados para este perfil foram suficiente para a formação de características vérticas. No Recôncavo, foi observado a maior influência do material de origem como fator de formação, devido a presença de estratificação horizontal e por originar solos com granulometria fina, o que implica em uma drenagem imperfeita e desacelera o processo de intemperismo. Nesta região, foi observada ainda a que o relevo mais acidentado proporcionou menor aprofundamento do horizonte B e maior descontinuidade dos atributos físicos e químicos no perfil.

Palavras-chave: Recôncavo Baiano; Semiárido; caulinita.

### ABSTRACTY

Atypical behaviors regarding the genesis of Vertisols were observed in two distinct areas of the State of Bahia, in the Brazilian Northeast region. In the municipality of Juazeiro, in the semi-arid region, there is the occurrence of Vertisols with predominantly kaolinite mineralogy, while in the Recôncavo region the Vertisols occur in humid climate and rugged relief. Thus, the present study had as objective to investigate the reason for these occurrences, as well as to understand how the formation factors act in these soils. For this, three profiles of Vertisol were selected in the semi-arid region and three in the Recôncavo region, where morphological, chemical, physical and mineralogical characterizations were performed. It was observed, for the semi-arid region, that the Vertisols are more weathered when near the São Francisco River. The profile closest to the São Francisco River presented a more advanced stage of weathering than expected for Vertisols, which is probably related to the contribution of previously weathered material. The low levels of 2:1 clay minerals observed for this profile were sufficient for the formation of vertic characteristics. In the Recôncavo, it was observed the greater influence of the parent rock as a formation factor, due to the presence of horizontal stratification and to originate soils with fine particle size, which implies an imperfect drainage and slows down the process of weathering. In this region, it was also observed that the steepest slope provided less

deepening of the B horizon and greater discontinuity of the physical and chemical attributes in the profile.

Key words: Recôncavo Baiano; semi-arid; kaolinite.

## INTRODUÇÃO

No Nordeste brasileiro, os Vertissolos ocorrem comumente nas regiões semiáridas, desempenhando importante papel na agropecuária, devido, principalmente, à sua elevada fertilidade natural (Araújo Filho et al., 2000). O clima semiárido é propício à formação de Vertissolos, visto que a baixa precipitação anual facilita a estabilidade de argilominerais expansivos e a distribuição irregular de chuvas favorece os processos de contração e expansão do solo, os quais são responsáveis pela formação de estruturas prismáticas (Pal et al., 2012).

No entanto, no município de Juazeiro-BA, com clima semiárido, foram relatadas áreas de Vertissolos com estágios intemperismo mais avançados que o comum (Silva et al., 1998). Neste caso, foi observada a predominância da caulinita na mineralogia do solo, mesmo sob regime climático que não favorece a sua formação.

Existem relatos de Vertissolos com mineralogia predominantemente caulínica, em que, mesmo assim, houve o desenvolvimento de feições morfológicas características desta classe de solo (Yerima et al., 1985, 1987; Yousif et al., 1988). Entretanto, a formação deste argilomineral em Vertissolos está relacionada com a presença de um clima mais úmido e melhores condições de drenagem, os quais possibilitam taxas de lixiviação adequadas para a solubilização das esmectitas (Coulombe et al., 1996). Não é, portanto, um comportamento comumente observado em áreas de clima seco, com prolongados períodos de estiagem, como ocorre no município de Juazeiro.

Por outro lado, uma das mais expressivas áreas de Vertissolos do Estado da Bahia se encontra na região do Recôncavo, próximo ao litoral, com clima úmido e altas taxas de precipitação anual média. Além disso, os Vertissolos desta região ocorrem em diversas situações de relevo, inclusive ondulado, em que o acúmulo de sais e Si não é, geralmente, favorecido (Yerima et al., 1985). Portanto, torna-se atípica a presença de solos pouco intemperizados nesta região, em que fatores como o clima e o relevo seriam, a princípio, desfavoráveis à estabilidade de argilominerais do tipo 2:1.

A redor do mundo é possível ver alguns exemplos de ocorrência atípica de Vertissolos, em áreas com precipitação média anual maior que normalmente observado para a gênese desta classe de solo, que gira em torno de 500 a 1000 mm anuais (Dudal, 1965). Casos deste tipo foram relatados na Indonésia (Oakes e Thorp, 1951; Dudal, 1965) e na Etiópia (Wubie, 2015; Debele e Deressa, 2016), em áreas com precipitação anual média de 2000 mm, na Guiana e em Trinidad e Tobago, com média de 3000 mm anuais (Dudal, 1965). Nestes casos, a gênese dos Vertissolos se deve à presença de períodos secos bem definidos, o que permite ao solo formar características como fendas, slickensides e estrutura prismática, decorrentes dos processos de expansão e contração.

Há ainda a formação de Vertissolos em climas úmidos sob depósitos calcários, aluviais, costeiros e deltaicos, nos quais a esmectita é alóctone, proveniente do material de origem antes mesmo à sua deposição (Ahmad, 1983). Nestes casos, as condições climáticas não são pré-requisitos para a formação dos Vertissolos, embora a sazonalidade das chuvas exerça um importante papel na formação das características vérticas (Dudal, 1965).

No Brasil, há a ocorrência de Vertissolos sob clima úmido no Estado do Acre, em áreas com precipitação média de 2000 mm (Bardales, 2005). Neste caso, a gênese destes solos está relacionada com a presença de paleoclimas secos, dificuldade de intemperização do material de origem sedimentar pelítico, sendo alguns com estratificação horizontal, e pela dificuldade de infiltração da água no solo.

Portanto, as duas áreas mencionadas acima, no Estado da Bahia, apresentam comportamentos atípicos no que diz respeito à gênese de Vertissolos, levantando a questão do porquê estes comportamentos estão ocorrendo e como os fatores de formação estão influenciando na gênese destes solos.

Deste modo, o presente estudo teve como objetivo compreender a gênese dos Vertissolos do Semiárido e do Recôncavo Baiano, assim como a influência do material de origem, do clima e do relevo sobre os atributos morfológicos, químicos, físicos e mineralógicos.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Áreas de estudo

O presente estudo foi realizado em duas regiões distintas do Estado da Bahia, sendo estas no município de Juazeiro e na região do Recôncavo. Estas duas áreas apresentam características distintas quanto ao clima, relevo e material de origem.

O município de Juazeiro está localizado no norte da Bahia, em clima semiárido, apresentando temperatura do mês mais frio superior a 18 °C e pluviosidade anual média entre 400 e 500 mm, distribuídas entre os meses de dezembro e abril.

Foram selecionados três perfis de Vertissolos nesta região, estando o perfil 1 (P01), o perfil 2 (P02) e o perfil 3 (P03) a aproximadamente 4, 13 e 35 km de distância do rio São Francisco, respectivamente. Todos os Vertissolos desta região são formados a partir de material de origem calcário da Formação Caatinga, em relevo predominantemente plano (Figura 1).

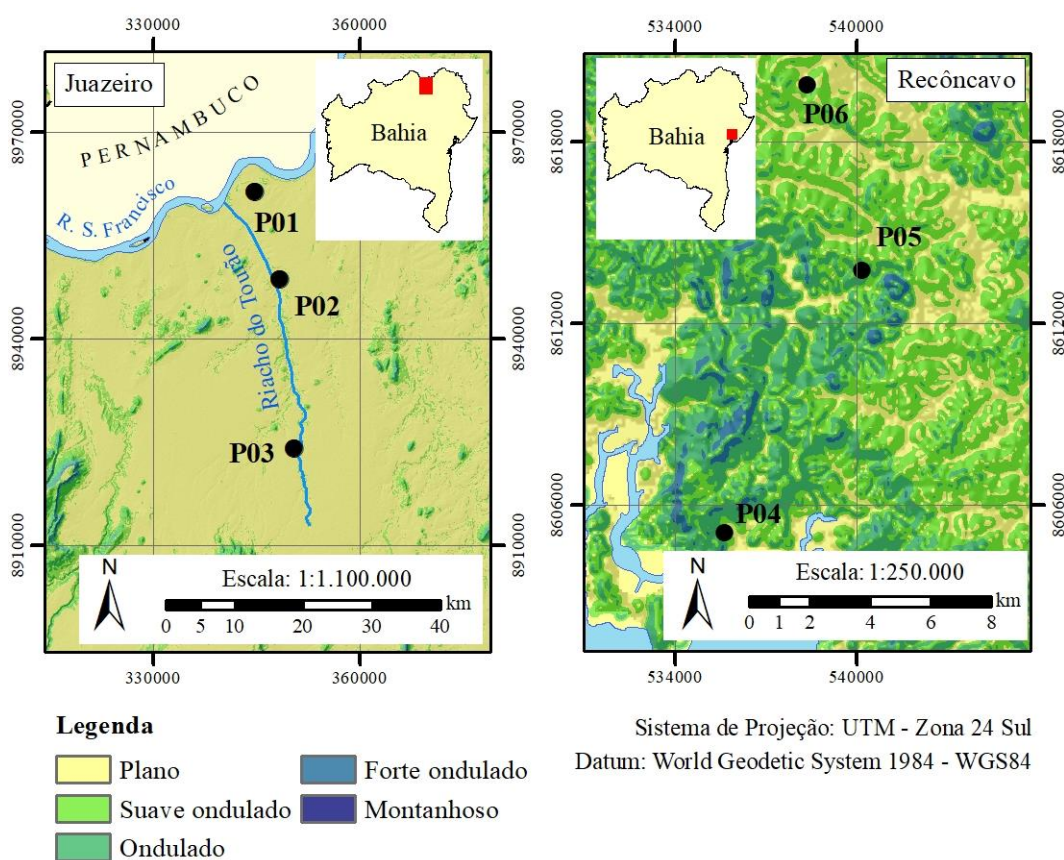


Figura 1. Localização dos perfis no município de Juazeiro, na região Semiárida, e na região do Recôncavo, sobre mapa de relevo. Fonte: imagem SRTM.

A região do Recôncavo está localizada no leste do Estado da Bahia, com clima úmido, apresentando precipitação média anual entre 1600 e 1800 mm e temperatura maior que 18 °C durante todo o ano. Nesta região foram também selecionados três Vertissolos, todos formados a partir dos folhelhos da Formação Candeias, em situações de relevo distintas.

O perfil 4 (P04) está situado no município de São Francisco do Conde, a aproximadamente 1 km da Baía de Todos os Santos, sob um relevo plano, abaciado e cercado por terrenos de cotas mais altas (Figura 1) onde há a transição do Formação Candeias para o Grupo Ilhas.

O perfil 5 (P05) se encontra no oeste do município de São Sebastião do Passé, com relevo regional suave ondulado a forte ondulado (Figura 1). Este perfil está posicionado no terço superior da encosta, com relevo local ondulado, sob pastagem.

O perfil 6 (P06) está localizado no nordeste do município de Santo Amaro, em um relevo local plano (Figura 1), sob cultivo de cana-de açúcar.

As informações sobre a localização de cada perfil, assim como sua classificação de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013), estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Localização dos perfis, classificação e dados do meio físico.

Perfil	Coordenada geográfica	Classificação do solo	Altitude	Relevo	Drenagem	Geologia	Material de origem
P01	9° 23' 33"S 40° 24' 49"W	VXo típico endosalino	m 384	Plano	Imperfeitamente drenado	Formação Caatinga	Produto de alteração do calcário
P02	9° 30' 30"S 40° 22' 52"W	VXz solódico	387	Plano	Imperfeitamente drenado	Formação Caatinga	Produto de alteração do calcário
P03	9° 43' 47"S 40° 21' 44"W	VXo típico hipocarbonático	437	Plano	Imperfeitamente drenado	Formação Caatinga	Produto de alteração do calcário
P04	12° 37' 05"S 38° 40' 18"W	VXo típico com carbonato	11	Plano	Imperfeitamente drenado	Formação Candeias	Folhelhos com lentes de calcário
P05	12° 32' 23"S 38° 37' 48"W	VXo típico	55	Ondulado	Imperfeitamente drenado	Formação Candeias	Folhelhos com lentes de calcário
P06	12° 29' 03"S 38° 38' 49"W	VXo solódico	86	Plano	Imperfeitamente drenado	Formação Candeias	Folhelhos com lentes de calcário

VXo = VERTISSOLO HÁPLICO Órtico; VXz = VERTISSOLO HÁPLICO Sáfico.

## Caracterização física e química

A caracterização química foi realizada nos horizontes superficiais, intermediários e mais profundos dos perfis de solos estudados. Para isto, foram coletadas amostras deformadas, as quais foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com abertura de malha de 2,0 mm de diâmetro, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA).

A partir da TFSA foram determinados: pH em água (1:2,5) e em KCl (1:2,5); teores trocáveis de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  extraídos com solução de KCl 1 mol  $\text{L}^{-1}$  e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; acidez potencial (H + Al) extraída com acetato de cálcio a pH 7,0;  $\text{K}^{+}$  e  $\text{Na}^{+}$  disponíveis extraídos com solução ácida Mehlich-1, todos de acordo com Donagemma et al. (2011). A partir dos resultados das análises químicas foram calculados os valores de soma de bases trocáveis (SB), capacidade de troca catiônica efetiva (t), capacidade de troca catiônica total (T), saturação do complexo de troca por bases (V), saturação do complexo de troca por  $\text{Al}^{3+}$  (m) e a porcentagem  $\text{Na}^{+}$  trocável (PST) (Donagemma et al., 2011).

O P disponível foi extraído com solução ácida Mehlich-1 (Defilippo e Ribeiro, 1997) e quantificado por espectrofotometria de absorção molecular (Murphy e Riley, 1962). O P remanescente foi determinado de acordo com Alvarez V. et al. (2000).

O teor de carbono orgânico total foi determinado pelo método de oxidação via úmida com aquecimento externo (Yeomans e Bremner, 1988). O carbonato de cálcio equivalente foi determinado por meio do ataque das amostras com solução de HCl 0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  e titulação com solução de NaOH 0,25 mol  $\text{L}^{-1}$  (Donagemma et al., 2011).

Foram também determinados os teores de Si ( $\text{SiO}_2$ ), Al ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Fe ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Mn (MnO) e Ti ( $\text{TiO}_2$ ), extraídos por digestão ácida da TFSA com ácido sulfúrico (1:1) e quantificado por espectrofotometria de absorção atômica. Após a quantificação foram calculadas as relações moleculares  $K_i$  e  $K_r$  (Donagemma et al., 2011).

Foram ainda determinados os sais solúveis no extrato do solo, obtido por meio da extração da solução da pasta saturada, deixada em repouso por 16 horas (Donagemma et al., 2011). Os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, enquanto os de  $\text{Na}^{+}$  e  $\text{K}^{+}$  foram obtidos por espectrofotometria de emissão atômica com chama. O teor de  $\text{HCO}_3^{-}$  foi determinado por acidimetria com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,0125 mol  $\text{L}^{-1}$ , o de  $\text{Cl}^{-}$  por meio da titulação com  $\text{AgNO}_3$  0,05 mol  $\text{L}^{-1}$  em presença de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$  5 % e o de  $\text{SO}_4^{2-}$  por espectrofotometria de absorção molecular. Foi

ainda determinada a condutividade elétrica (CE) a 25 °C do extrato de saturação, obtido por meio de condutivímetro de bancada.

A caracterização física foi realizada em todos os horizontes dos perfis estudados. A análise granulométrica foi realizada por meio da dispersão física e química da TFSA, agitando-a em agitador orbital do tipo Wagner, por 16 horas a 50 rpm, junto com solução de hexametáfosfato 0,2 mol L<sup>-1</sup>. Em seguida, a fração areia total foi separada por peneiramento, utilizando-se peneira com malha de 0,053 mm e subdividida em areia grossa e fina por peneiramento, com peneira com malha de 0,2 mm. As frações silte e argila foram separadas por sedimentação e quantificadas por meio de alíquotas pipetadas antes e depois da sedimentação do silte (Almeida et al., 2013).

O teor de argila dispersa em água (ADA) foi determinado utilizando o mesmo procedimento descrito na análise granulométrica sem a utilização do dispersante químico (Almeida et al., 2013). A partir dos resultados obtidos, foi calculado o grau de floculação da argila (GF) (Donagemma et al., 2011).

A análise de densidade das partículas (Dp) foi realizada pelo método do balão volumétrico (Donagemma et al., 2011). Para análise de densidade do solo (Ds) foi considerado o volume do solo seco em estufa a 105 °C, determinada pelo método do torrão parafinado (Donagemma et al., 2011). Para isso foram coletadas amostras não deformadas (torrões), com aproximadamente 5 cm de diâmetro, em cada horizonte dos perfis estudados, os quais foram secos em estufa e impermeabilizados por imersão em parafina a 70 °C, sendo o volume medido por deslocamento do volume de água. A porosidade total foi estimada a partir dos resultados obtidos nas análises de Dp e Ds, de acordo com a equação  $P_t = 1 - (D_s/D_p)$ .

O coeficiente de expansão linear (COLE) foi determinado pelo método da seringa (COLERod) (Schafer e Singer, 1976). Para isso, foram feitas pastas saturadas com amostras da TFSA, que ficaram em repouso por 24 horas. Passado este tempo, foram transferidas para seringa com abertura de 1 cm de diâmetro e, em seguida, foram feitos filetes com tamanho entre 6 e 10 cm. A umidade dos filetes foi padronizada, deixando-os em câmara de pressão a 33 kPa por 72 horas. Após este tempo, os filetes foram medidos com paquímetro, colocados em estufa de circulação de ar forçada a 105 °C por 48 horas e medidos novamente. Após estes procedimentos, foi determinado o COLERod pela relação entre seus comprimentos antes (Lm) e depois (Ld) de secos em estufa, de acordo com a equação:  $COLERod = (L_m - L_d)/L_d$ .

Foi ainda determinada a área superficial específica (ASE) das frações silte e argila dos horizontes superficiais, intermediários e mais profundos dos perfis, pelo método da saturação com vapor de água (Quirk, 1955).

### **Caracterização mineralógica**

Para a identificação das fases minerais da fração argila, utilizou-se a argila natural (Whittig e Allardice, 1986), para os horizontes superficiais, intermediários e mais profundos, e desferrificada, para os intermediários. A argila desferrificada recebeu ainda tratamentos com saturação de  $MgCl_2$ , KCl e LiCl. A amostra de argila saturada com  $MgCl_2$  foi irradiada logo após a saturação (Mg) e após solvatação com glicerol (Mg-Gl) (Whittig e Allardice, 1986). A amostra saturada com KCl foi irradiada sob temperatura ambiente a 25 °C (K25) e após aquecimento a 350 °C (K350) e 550 °C (K550) (Harris e White, 2008). A amostra saturada com LiCl foi aquecida a 270 °C e irradiada antes (Li270) e após solvatação com glicerol (Li270-Gl) (Greene-Kelly, 1953).

Em todos os tratamentos da fração argila, as amostras foram analisadas após orientação sobre lâmina de vidro. Para a identificação das frações areia silte foram utilizadas amostras montadas em lâminas escavadas sem orientação (montagem em pó).

Em todos os casos, as amostras foram analisadas por meio de difratometria de raios-X (DRX), com radiação  $CoK\alpha$ , operado a 40 kV e 40 mA. As lâminas foram varridas com velocidade de  $5^\circ 2\theta \text{ min}^{-1}$ , entre os ângulos de 3 e  $50^\circ 2\theta$ , para a fração argila natural, entre 3 e  $35^\circ$ , para argila desferrificada, e entre 4 e  $50^\circ 2\theta$ , para as frações silte e areia.

Para interpretação dos difratograma e identificação das fases minerais foram adotados critérios com base no espaçamento interplanar (d) e no comportamento dos picos de difração (JCPDS, 1974; Resende et al., 2005; Pansu e Gautheyrou, 2006).

## **RESULTADOS**

### **Atributos morfológicos**

Os Vertissolos do Recôncavo apresentaram horizontes superficiais mais espessos do que os observados nos solos do Semiárido. Na primeira região, estes horizontes apresentaram estrutura prismática (P04 e P05) e em blocos subangulares (P06), enquanto no Semiárido foram observadas estruturas blocos angulares e granular em superfície, evidenciando processo de autogranulação (Tabela 2).

Tabela 2. Atributos morfológicos dos Vertissolos do Estado da Bahia

Horiz.	Prof.	Cor úmida <sup>(1)</sup>	Estrutura <sup>(2)</sup>	Superfícies de fricção	Consistência			Transição
					Seca	Úmida	Molhada	
<b>P01 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico endosalino – Juazeiro-BA</b>								
Ap	0-6	10YR 4/4	Moderada pequena blocos angulares e média granular	-	Dura	Firme	Muito plástica e muito pegajosa	Clara e plana
Biv1	6-30	10YR 4/4	Moderada grande e muito grande prismática composta de blocos angulares	-	Muito dura	Muito firme	Muito plástica e muito pegajosa	Difusa e plana
Biv2	30-80	10YR 4/4	Moderada grande e muito grande prismática composta de blocos angulares	Comum e moderada	Muito dura	Muito firme	Muito plástica e muito pegajosa	Difusa e plana
Biv3	80-115	10YR 4/4	Moderada grande e muito grande prismática composta de blocos angulares	Comum e muito forte	Muito dura	Muito firme	Muito plástica e muito pegajosa	Difusa e plana
Cv	115-125+	10YR 4/4	Moderada grande e muito grande prismática composta de blocos angulares	Comum e muito forte	Muito dura	Muito firme	Muito plástica e muito pegajosa	
<b>P02 – VERTISSOLOS HÁPLICO Sálico solódico – Juazeiro-BA</b>								
A	0-6	10YR 4/1	Moderada pequena blocos angulares e média granular	-	Muito dura	Firme a muito firme	Plástica e muito pegajosa	Clara e plana
Biv1	6-25	10YR 4/1	Fraca a moderada grande prismática composta de blocos angulares	Comum e moderada	Muito dura a extremamente dura	Firme a muito firme	Plástica e muito pegajosa	Difusa e plana
Biv2	25-80	10YR 4/1	Fraca a moderada grande e muito grande prismática composta de blocos angulares	Comum e muito forte	Muito dura a extremamente dura	Firme a muito firme	Plástica e muito pegajosa	Clara e ondulada
BCz	80-105	10YR 5/2	Maciça	-	Muito dura	Firme	Ligeiramente plástica e pegajosa	Difusa e ondulada
Cz	105-125	10YR 5/4	Maciça	-	Dura	Firme	Ligeiramente plástica e pegajosa	Clara e ondulada
Crz	125-175+	10YR 6/3	Maciça	-	Macia	Muito friável	Não plástica e não pegajosa	-
<b>P03 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico hipocarbonático – Juazeiro-BA</b>								
Ap	0-5	10YR 4/1	Moderada pequena blocos angulares e média granular	-	Muito dura a extremamente dura	Firme a muito firme	Muito plástica e muito pegajosa	Clara e plana
Biv1	5-24	10YR 4/1	Fraca a moderada grande prismática composta de blocos angulares	Comum e moderada	Muito dura a extremamente dura	Firme a muito firme	Muito plástica e muito pegajosa	Difusa e plana
Biv2	24-50+	10YR 4/1	Fraca a moderada grande e muito grande prismática composta de blocos angulares	Comum e muito forte	Muito dura a extremamente dura	Firme a muito firme	Muito plástica e muito pegajosa	-

Horiz. = horizonte; Prof. = profundidade. <sup>(1)</sup>Sistema Munsell; <sup>(2)</sup>Grau de desenvolvimento, tamanho e forma.

Tabela 2 (cont). Atributos morfológicos dos Vertissolos do Estado da Bahia

Horiz.	Prof.	Cor úmida <sup>(1)</sup>	Estrutura <sup>(2)</sup>	Superfícies de fricção	Consistência			Transição
					Seca	Úmida	Molhada	
cm								
<b>P04 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico com carbonato – São Francisco do Conde-BA</b>								
Ap	0-20	10YR 3/1	Moderada grande prismática	-	Extremamente dura	Firme	Muito plástica e muito pegajosa	Pana e clara
ABv	20-42	10YR 4/3	Fraca a moderada grande prismática	-	Muito dura	Firme	Muito plástica e muito pegajosa	Difusa e plana
Biv	42-73	10YR 5/4	Moderada grande prismática	Pouca e moderada	Muito dura	Firme	Muito plástica e muito pegajosa	Plana e clara
2C1	73-98	10YR 4/3	Maciça	-	Dura	Muito friável	Não plástica e ligeiramente pegajosa	Clara e plana
3C2	98-120+	10YR 5/4	Maciça	-	Muito dura	Friável	Plástica e pegajosa	-
<b>P05 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico - São Sebastião do Passé-BA</b>								
Ap	0-18	10YR 4/2	Moderada a forte grande prismática composta de blocos angulares	-	Muito dura	Firme	Muito plástica e muito pegajosa	Difusa e plana
Biv	18-38	10YR 4/2	Moderada a forte grande e muito grande prismática composta de blocos angulares	Pouca e moderada	Muito dura	Firme	Muito plástica e muito pegajosa	Difusa e plana
BCv	38-58	10YR 4/2	Fraca a moderada grande e muito grande prismática composta de blocos angulares	-	Muito dura	Firme	Ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa	Clara e plana
Cv	58-72	10YR 4/2	Maciça	-	Ligeiramente dura	Firme	Não plástica e ligeiramente pegajosa	Difusa e plana
Cr	72-85+	10YR 4/2	Maciça	-	Ligeiramente dura	Firme	Não plástica e ligeiramente pegajosa	-
<b>P06 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico – Santo Amaro-BA</b>								
Ap	0-13	10YR 3/2	Moderada pequena e média blocos subangulares	-	Dura	Firme	Muito plástica e muito pegajosa	Clara e plana
ABv	13-25	10YR 4/4	Forte muito grande prismática	-	Dura	Firme	Muito plástica e muito pegajosa	Clara e plana
Bivn	25-48	10YR 5/4	Forte muito grande prismática	Comum e forte	Muito dura	Muito firme	Muito plástica e muito pegajosa	Clara e plana
BCvn	48-74	10YR 4/6	Moderada muito grande prismática	Comum e forte	Muito dura	Muito firme	Muito plástica e muito pegajosa	Clara e plana
Cvn	74-100+	10YR 4/4 5G 7/1	Fraca muito grande colunar	-	Muito dura	Muito firme	Muito plástica e pegajosa	-

Horiz. = horizonte; Prof. = profundidade. <sup>(1)</sup>Sistema Munsell; <sup>(2)</sup>Grau de desenvolvimento, tamanho e forma.

Os horizontes B dos solos do Semiárido se mostraram, em média, mais espessos que os do Recôncavo, inclusos os horizontes AB. Em todos os solos, estes horizontes apresentaram estrutura prismática, variando de grande a muito grande, composta por blocos angulares em alguns casos (P01, P02, P03 e P05). Foi também observado, para todos os perfis, a formação de *slickensides* nos horizontes B, sendo estes mais frequentes e nítidos nos Vertissolos da região Semiárida (Tabela 2).

Os horizontes A e B, de todos os solos analisados, apresentaram consistência do solo seco entre dura e extremamente dura, além de consistência muito plástica e muito pegajosa quando molhado. Apenas no P02 foi observada consistência plástica e pegajosa, devido à maior presença de material grosseiro (Tabela 2). Todos os perfis apresentaram fendilhamento destes horizontes, sendo a espessura das fendas superior a 1 cm. Fendas nos horizontes BC, C ou Cr foram observadas apenas nos P01, P05 e P06.

Todos os solos apresentaram coloração úmida de matiz 10YR, variado apenas os valores e os cromas. Uniformidade da coloração dos horizontes A e B foi observada para os perfis do Semiárido e para o P05, enquanto os P04 e P06 apresentaram horizonte A mais escuros em relação ao B, indicando acúmulo de matéria orgânica. Foi observada ainda, coloração mosqueada no horizonte C<sub>vn</sub> do P06, composta por bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida) e cinza-esverdeado-claro (5G 7/1, úmida) (Tabela 2).

### **Características químicas**

Todos os Vertissolos estudados apresentaram saturação por bases superior a 50 %, altos teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> e teores de K<sup>+</sup> mais elevados em superfície (Tabela 3). Foram observados ainda, teores elevados de P nos P04 e P05, além de teores relativamente altos de Al<sup>3+</sup> no P06, acompanhado dos menores valores de P-rem e pH próximo a 5,0 (Tabela 3).

O P02 apresentou elevada PST a partir do horizonte Biv2 (Tabela 3), tendo caráter solódico neste horizonte e caráter sódico abaixo de 105 cm. Comportamento semelhante foi observado no P06, o qual apresentou caráter solódico no horizonte C<sub>vn</sub> (Tabela 3).

Teores elevados de carbonato equivalente foram observados nos horizontes com pH próximo a 8,0, como nos horizontes Biv2 e BCz do P02, e em todos do P04 (Tabela 3). No entanto, apenas o P02 apresentou caráter hipocarbonático, com teores de carbonato equivalente superiores a 50 g kg<sup>-1</sup> (Santos et al., 2013).

Tabela 3. Caracterização química dos Vertissolos do Estado da Bahia

Horiz	Prof. cm	pH		P mg dm <sup>-3</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	T	V	m %	PST	COT dag kg <sup>-1</sup>	Carb. eq. g kg <sup>-1</sup>	P-rem mg L <sup>-1</sup>
		Água	KCl															
<b>P01 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico endosalino – Juazeiro-BA</b>																		
Ap	0-6	7,4	6,0	11,30	24,73	3,80	0,50	0,25	0,00	1,00	29,28	30,28	96,70	0,00	0,81	1,04	3,62	26,70
Biv2	30-80	8,0	6,4	1,70	27,17	3,32	0,08	0,46	0,00	0,80	31,03	31,83	97,50	0,00	1,44	0,41	4,62	21,50
Cv	115-125+	7,5	6,5	1,10	30,98	4,36	0,05	0,98	0,00	0,70	36,37	37,07	98,10	0,00	2,65	0,41	2,68	19,90
<b>P02 – VERTISSOLOS HÁPLICO Sáfico solódico – Juazeiro-BA</b>																		
A	0-6	7,7	6,54	12,50	27,23	4,99	1,75	0,13	0,00	0,80	34,11	34,91	97,70	0,00	0,37	1,06	3,56	33,80
Biv2	25-80	7,87	6,51	9,10	28,62	4,58	0,24	4,37	0,00	0,70	37,81	38,51	98,20	0,00	11,35	0,47	9,19	40,40
Cz	105-125	8,1	7,13	182,50	25,74	4,55	0,25	8,33	0,00	0,50	38,86	39,36	98,70	0,00	21,15	0,10	23,53	35,50
<b>P03 – VERTISSOLOS HÁPLICO Órtico típico hipocarbonático – Juazeiro-BA</b>																		
Ap	0-5	8,05	6,78	0,40	57,08	4,80	0,18	0,07	0,00	0,20	62,13	62,33	99,70	0,00	0,11	0,93	81,94	20,50
Biv2	24-50+	8,30	6,82	0,30	55,44	4,90	0,04	0,22	0,00	0,70	60,61	61,31	98,90	0,00	0,37	0,75	80,65	26,00
<b>P04 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico com carbonato – São Francisco do Conde-BA</b>																		
Ap	0-20	7,29	6,13	70,70	34,42	9,40	0,56	0,18	0,00	1,70	44,56	46,26	96,30	0,00	0,38	2,42	13,12	26,80
Biv	42-73	8,21	6,97	64,70	31,73	6,77	0,09	0,12	0,00	1,20	38,71	39,91	97,00	0,00	0,30	0,63	33,49	23,50
3C2	98-120+	8,09	6,90	75,80	31,46	8,30	0,22	0,55	0,00	1,20	40,53	41,73	97,10	0,00	1,31	0,65	16,41	22,00
<b>P05 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico - São Sebastião do Passé-BA</b>																		
Ap	0-18	6,78	5,50	91,50	18,43	9,17	0,81	0,07	0,00	2,60	28,49	31,09	91,60	0,00	0,23	1,95	1,69	32,10
Biv	18-38	6,44	5,02	27,50	19,53	9,59	0,40	0,09	0,00	4,10	29,61	33,71	87,80	0,00	0,25	1,30	1,00	29,30
BCv	38-58	7,26	5,70	398,50	26,39	12,74	0,29	0,15	0,00	2,30	39,57	41,87	94,50	0,00	0,37	0,88	4,87	33,80
Cr	72-85+	7,97	6,23	434,70	27,35	13,74	0,20	0,14	0,00	0,70	41,42	42,12	98,30	0,00	0,33	0,65	8,92	36,00
<b>P06 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico – Santo Amaro-BA</b>																		
Ap	0-13	5,22	3,79	7,70	21,25	10,59	0,47	0,12	1,70	9,20	32,43	41,63	77,90	5,00	0,28	2,12	1,19	16,80
Bivn	25-48	5,23	3,58	1,10	19,69	12,67	0,20	0,31	10,70	16,30	32,87	49,17	66,80	24,60	0,63	0,85	0,00	7,40
Cvn	74-100+	4,74	3,61	1,10	23,60	20,62	0,32	4,72	3,70	6,60	49,25	55,85	88,20	7,00	8,45	0,79	1,87	9,60

Horiz. = horizonte; Prof. = profundidade; SB = soma de bases; T = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; m = saturação por alumínio; PST = porcentagem de sódio trocável; Ca:Mg = relação cálcio:magnésio; Ca:Na = relação cálcio:sódio; COT = carbono orgânico total; Carb. eq. = carbonato de cálcio equivalente; P-rem = fósforo remanescente.

Os Vertissolos do Semiárido apresentaram baixos teores de COT nos horizontes superficiais, variando entre 0,93 e 1,06 dag kg<sup>-1</sup> (Tabela 3). Na região do Recôncavo foi observado maiores teores de COT em superfície, estando os valores entre 1,95 e 2,42 dag kg<sup>-1</sup> (Tabela 3), o que é comum para Vertissolos em climas úmidos (Pal et al., 2012).

Não foram observadas quantidades expressivas de óxidos de Ti e Mn em nenhum dos perfis, sendo os menores teores observados nos Vertissolos do Semiárido (Tabela 4). Os menores valores de Ki e Kr foram observados no P01, atingindo valores máximos de 2,90 e 2,41, respectivamente (Tabela 4). Os demais perfis apresentaram valores elevados de Ki, variando entre 3,74 a 4,74 (Tabela 4).

Tabela 4. Composição química da fração argila dos Vertissolos do Estado da Bahia

Horiz.	Prof.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	Ki	Kr
	cm	dag kg <sup>-1</sup>						
<b>P01 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico endosalino – Juazeiro-BA</b>								
Ap	0-6	21,85	13,53	4,47	0,042	0,209	2,75	2,27
Biv2	30-80	23,80	14,24	4,80	0,034	0,206	2,84	2,34
Cv	115-125+	24,66	14,42	4,65	0,033	0,209	2,90	2,41
<b>P02 – VERTISSOLOS HÁPLICO Sáfico solódico – Juazeiro-BA</b>								
A	0-6	14,19	6,21	2,75	0,052	0,209	3,88	3,03
Biv2	25-80	14,21	6,38	2,70	0,049	0,202	3,79	2,98
Cz	105-125	14,55	5,50	3,60	0,059	0,248	4,50	3,17
<b>P03 – VERTISSOLOS HÁPLICO Órtico típico hipocarbonático – Juazeiro-BA</b>								
Ap	0-5	23,01	8,92	4,12	0,084	0,304	4,39	3,39
Biv2	24-50+	20,36	8,95	3,92	0,082	0,347	3,87	3,03
<b>P04 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico com carbonato – São Francisco do Conde-BA</b>								
Ap	0-20	23,62	8,48	5,73	0,062	0,122	4,74	3,31
Biv	42-73	21,36	8,35	6,45	0,070	0,137	4,35	2,91
3C2	98-120+	22,08	8,76	6,21	0,071	0,169	4,28	2,95
<b>P05 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico - São Sebastião do Passé-BA</b>								
Ap	0-18	17,28	7,70	4,61	0,087	0,127	3,82	2,76
Biv	18-38	19,06	8,66	4,84	0,086	0,145	3,74	2,76
BCv	38-58	28,54	11,44	6,68	0,082	0,237	4,24	3,09
Cr	72-85+	30,31	12,74	8,10	0,049	0,284	4,04	2,88
<b>P06 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico – Santo Amaro-BA</b>								
Ap	0-13	24,06	10,74	7,79	0,147	0,145	3,81	2,60
Bivn	25-48	32,08	13,06	8,59	0,016	0,215	4,18	2,94
Cvn	74-100+	31,74	13,84	9,05	0,017	0,214	3,90	2,75

Horiz. = horizonte; Prof. = profundidade; Ki = relação molecular SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Kr = relação molecular SiO<sub>2</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

As maiores condutividades elétricas (CE) do extrato da pasta saturada foram observadas no horizonte mais profundo do P01 (4,51 dS m<sup>-1</sup>), apresentando caráter sáfico,

e nos horizontes mais profundos que 80 cm do P02 (7,07 a 7,34 dS m<sup>-1</sup>), com caráter salino. (Tabela 5). Para todos os perfis, o aumento dos valores de CE foi acompanhado por um aumento dos teores de cloreto em solução, o qual foi o ânion mais presente dentre os sais solúveis (Tabela 5). Dentre os cátions, foram observados, na maior parte dos casos, maiores teores de Na<sup>+</sup>, seguido por Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup> em ordem decrescente (Tabela 5).

Tabela 5. Sais solúveis presentes no extrato da pasta saturada dos Vertissolos do Estado da Bahia

Horiz.	Prof.	Água %	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
					cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>						
<b>P01 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico endosalino – Juazeiro-BA</b>											
Ap	0-6	36,81	7,57	0,63	3,92	0,92	2,41	13,98	0,19	5,00	0,92
Biv1	6-30	34,96	7,47	0,62	10,71	1,30	1,00	10,95	0,19	7,00	0,76
Biv2	30-80	35,33	7,47	0,68	4,28	0,67	0,34	17,07	0,06	6,50	0,27
Biv3	80-115	35,81	7,33	1,30	7,61	1,19	0,52	34,26	0,06	13,50	0,65
Cv	115-125+	41,99	7,14	4,51	31,48	5,06	0,98	189,45	0,06	52,00	6,09
<b>P02 – VERTISSOLOS HÁPLICO Sálco solódico – Juazeiro-BA</b>											
A	0-6	37,08	8,06	1,12	11,28	2,82	9,69	5,92	0,88	15,00	0,91
Biv1	6-25	38,30	7,90	0,63	4,28	0,92	1,90	13,40	0,19	5,50	0,42
Biv2	25-80	40,35	7,70	2,29	10,35	1,88	2,00	107,15	0,19	25,50	0,42
BCz	80-105	41,84	7,33	7,07	26,26	5,62	3,30	276,30	0,13	81,50	0,28
Cz	105-125	40,44	7,17	7,15	27,94	5,93	3,56	272,76	0,13	84,25	0,17
Crz	125-175+	26,71	7,23	7,34	33,20	7,41	3,82	267,20	1,81	91,00	0,09
<b>P03 – VERTISSOLOS HÁPLICO Órtico típico hipocarbonático – Juazeiro-BA</b>											
Ap	0-5	40,65	7,95	0,42	5,16	0,47	1,13	2,42	0,31	1,50	0,87
Biv1	5-24	42,35	7,78	0,23	4,78	0,26	0,37	3,25	0,38	1,00	0,78
Biv2	24-50+	43,40	7,80	0,25	5,62	0,22	0,47	38,67	0,13	1,00	0,56
<b>P04 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico com carbonato – São Francisco do Conde-BA</b>											
Ap	0-20	56,66	7,84	0,94	8,97	3,13	3,94	5,70	0,69	7,50	0,47
ABv	20-42	50,10	8,05	0,51	4,93	1,33	1,13	3,73	0,31	1,50	0,19
Biv	42-73	49,13	7,96	0,37	2,96	0,98	0,85	3,51	0,31	1,50	0,39
2C1	73-98	31,95	7,72	0,62	3,86	1,33	1,26	9,20	0,25	5,50	1,53
3C2	98-120+	55,09	7,60	0,65	3,77	1,54	1,26	14,01	0,25	5,00	1,65
<b>P05 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico – São Sebastião do Passé-BA</b>											
Ap	0-18	52,33	7,52	0,45	3,29	2,13	6,50	4,83	0,31	2,00	0,72
Biv	18-38	50,60	7,08	0,35	1,97	1,47	2,03	12,04	0,25	1,50	0,44
BCv	38-58	51,59	7,70	0,24	1,19	1,02	1,11	11,60	0,25	1,00	0,49
Cv	58-72	46,89	7,77	0,24	1,38	0,98	0,65	10,95	0,25	1,00	0,31
Cr	72-85+	44,90	7,87	0,26	1,61	1,16	0,90	11,60	0,25	1,00	0,79
<b>P06 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico – Santo Amaro-BA</b>											
Ap	0-13	49,55	4,79	0,30	1,40	0,92	1,87	4,30	0,00	2,25	0,30
ABv	13-25	60,34	4,91	0,14	0,38	0,43	0,49	4,21	0,00	1,00	0,56
Bivn	25-48	59,69	4,90	0,12	0,19	0,22	0,60	12,48	0,00	1,00	0,75
BCvn	48-74	61,72	5,01	0,19	0,23	0,33	0,52	15,54	0,00	1,50	0,90
Cvn	74-100+	69,36	4,78	2,03	4,95	5,24	1,80	42,08	0,00	20,50	1,93

Horiz. = horizonte; Prof. = profundidade; CE = condutividade elétrica a 25 °C.

### **Características físicas**

Os perfis localizados no Semiárido apresentaram baixa porcentagem de cascalho em todos os perfis, com valores menores que 10 %, exceto o horizonte mais profundo do P02, com 15 % de cascalho (Tabela 6). A composição do cascalho foi basicamente uma mistura de quartzo e fragmentos de calcário, sendo o quartzo mais predominante nos primeiros 80 cm do P02 e o calcário mais predominante no P01, ao longo de todo o perfil.

Tabela 6. Caracterização física dos Vertissolos do Estado da Bahia

Horiz.	Prof. cm	- Amostra Total -		Terra Fina (< 2,00 mm)							Ds	Dp	Pt	COLERod	ASEa	ASEs
		Cascalho	T. Fina	AG	AF	Silte	Arg	ADA	GF	S/Arg						
				%							— g cm <sup>-3</sup> —		cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	— m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> —		
<b>P01 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico endosalino – Juazeiro-BA</b>																
Ap	0-6	0,28	99,72	13,41	13,12	14,26	59,21	21,23	64,13	0,241	-	2,58	-	0,090	88,90	5,92
Biv1	6-30	1,36	98,64	12,10	12,07	11,00	64,83	4,65	92,83	0,170	1,69	2,67	0,37	0,096	-	-
Biv2	30-80	1,14	98,86	12,15	12,03	10,35	65,46	20,47	68,73	0,158	1,79	2,71	0,34	0,096	95,19	1,98
Biv3	80-115	0,97	99,03	10,55	11,25	10,86	67,33	4,03	94,02	0,161	1,77	2,72	0,35	0,096	-	-
Cv	115-125+	0,79	99,21	9,51	10,32	10,28	69,90	7,51	89,26	0,147	1,77	2,62	0,32	0,101	89,78	1,08
<b>P02 – VERTISSOLOS HÁPLICO Sáfico solódico – Juazeiro-BA</b>																
A	0-6	6,24	93,76	23,08	14,03	27,34	35,55	4,76	86,61	0,769	-	2,56	-	0,076	142,18	0,00
Biv1	6-25	4,24	95,76	25,95	11,51	25,71	36,83	23,00	37,55	0,698	1,91	2,63	0,27	0,101	-	-
Biv2	25-80	5,08	94,92	27,37	11,91	23,72	36,99	12,81	65,37	0,641	1,90	2,70	0,30	0,114	159,37	0,18
BCz	80-105	3,49	96,51	33,80	12,44	19,14	34,62	11,02	68,17	0,553	1,87	2,69	0,31	0,100	-	-
Cz	105-125	6,05	93,95	38,29	16,50	15,01	30,20	6,16	79,59	0,497	1,84	2,69	0,32	0,081	136,10	11,52
Crz	125-175+	14,99	85,01	65,33	10,28	10,52	13,86	7,18	48,17	0,759	1,59	2,70	0,41	-	-	-
<b>P03 – VERTISSOLOS HÁPLICO Órtico típico hipocarbonático – Juazeiro-BA</b>																
Ap	0-5	5,78	94,22	13,06	9,39	35,97	41,58	21,47	48,37	0,865	-	2,63	-	0,194	243,50	21,83
Biv1	5-24	2,56	97,44	16,28	7,16	32,84	43,71	6,73	84,60	0,751	1,72	2,64	0,35	0,196	-	-
Biv2	24-50+	2,64	97,36	14,83	7,14	32,31	45,71	20,85	54,40	0,707	1,76	2,64	0,33	0,198	238,46	17,79
<b>P04 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico com carbonato – São Francisco do Conde-BA</b>																
Ap	0-20	0,12	99,88	1,38	14,46	44,33	39,83	17,71	55,54	1,113	1,80	2,67	0,33	0,175	114,19	21,81
ABv	20-42	2,41	97,59	3,20	17,28	36,25	43,27	16,79	61,19	0,838	1,77	2,67	0,34	0,125	-	-
Biv	42-73	1,11	98,89	2,55	19,02	34,35	44,08	17,57	60,13	0,779	1,80	2,65	0,32	0,124	99,41	28,93
2C1	73-98	44,69	55,31	5,08	10,26	42,35	42,31	18,09	57,25	1,001	1,67	2,70	0,38	0,083	-	-
3C2	98-120+	0,06	99,94	0,54	12,95	41,11	45,41	9,00	80,19	0,905	1,74	2,67	0,35	0,150	100,35	17,31

Horiz. = horizonte; Prof. = profundidade; T. Fina = fração terra fina (< 2,00 mm); AG = areia grossa; AF = areia fina; S = silte; Arg = argila; ADA = argila dispersa em água; GF = grau de floculação; S/Arg = relação silte:argila; Ds = densidade do solo seco a 105 °C; Dp = densidade de partículas; Pt = Porosidade total do solo seco a 105 °C; COLERod = coeficiente de extensão linear (método da seringa); ASEa = área superficial específica da argila; ASEs = área superficial específica do silte.

Tabela 6 (cont.). Caracterização física dos Vertissolos do Estado da Bahia

Horiz.	Prof. cm	- Amostra Total -		Terra Fina (< 2,00 mm)							D <sub>s</sub>	D <sub>p</sub>	Pt	COLE <sub>rod</sub>	ASE <sub>a</sub>	ASE <sub>s</sub>
		Cascalho	T. Fina	AG	AF	Silte	Arg	ADA	GF	S/Arg						
<b>P05 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico - São Sebastião do Passé-BA</b>																
Ap	0-18	0,46	99,54	9,92	22,14	28,58	39,36	8,54	78,30	0,726	1,74	2,56	0,32	0,108	119,84	18,21
Biv	18-38	0,18	99,82	9,13	18,90	29,55	42,42	19,84	53,23	0,697	1,76	2,63	0,33	0,135	124,88	18,38
BCv	38-58	24,02	75,98	0,86	1,61	45,07	52,46	26,21	50,04	0,859	1,73	2,72	0,36	0,103	133,87	32,88
Cv	58-72	27,76	72,24	0,32	0,54	42,35	56,78	31,54	44,45	0,746	1,73	2,69	0,36	0,097	-	-
Cr	72-85+	26,20	73,80	0,40	0,30	46,38	52,92	11,92	77,48	0,876	1,74	2,69	0,35	0,092	125,67	48,10
<b>P06 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico – Santo Amaro-BA</b>																
Ap	0-13	0,57	99,43	3,50	4,90	32,74	58,85	32,52	44,74	0,556	1,66	2,52	0,34	0,144	148,05	27,88
ABv	13-25	0,06	99,94	2,19	2,41	22,48	72,92	15,06	79,35	0,308	1,77	2,66	0,33	0,194	-	-
Bivn	25-48	0,03	99,97	0,89	0,78	7,65	90,68	11,36	87,47	0,084	1,71	2,72	0,37	0,212	155,93	28,69
BCvn	48-74	0,02	99,98	0,56	0,89	13,06	85,50	33,76	60,51	0,153	1,73	2,67	0,35	0,239	-	-
Cvn	74-100+	0,02	99,98	0,66	1,00	11,85	86,49	15,61	81,96	0,137	1,70	2,76	0,38	0,248	153,09	18,06

Horiz. = horizonte; Prof. = profundidade; T. Fina = fração terra fina (< 2,00 mm); AG = areia grossa; AF = areia fina; S = silte; Arg = argila; ADA = argila dispersa em água; GF = grau de flocação; S/Arg = relação silte:argila; D<sub>s</sub> = densidade do solo seco a 105 °C; D<sub>p</sub> = densidade de partículas; Pt = Porosidade total do solo seco a 105 °C; COLE<sub>rod</sub> = coeficiente de extensão linear (método da seringa); ASE<sub>a</sub> = área superficial específica da argila; ASE<sub>s</sub> = área superficial específica do silte.

Dentre os perfis do Semiárido, o P01 apresentou granulometria mais fina, com menores porcentagens de areia grossa e silte e maior porcentagem de argila, o que resultou numa menor relação silte/argila (Tabela 6). Embora mais argiloso que os demais solos da mesma região, o P01 apresentou menores valores de COLERod e de ASEa (Tabela 6).

O P02 apresentou maiores porcentagens de areia grossa e menores de argila dentre os perfis do Semiárido, além de ter os menores valores de ASE da fração silte, considerando uma profundidade de 80 cm (Tabela 6). Abaixo de 80 cm, a ASE da fração silte foi maior do que os valores observados no P01 (Tabela 6). O P03 apresentou, em média, porcentagens de silte maiores que as observadas nos P01 e P02 (Tabela 6), no entanto, foi o solo com maior COLERod em todos os horizontes. Além disso, as frações silte e argila deste solo apresentaram maiores ASE dentre os demais do Semiárido (Tabela 6).

Na região do recôncavo, o cascalho é predominantemente composto por fragmentos de folhelho com alto grau de intemperismo, sendo um material bastante poroso e tenro. Apenas o P06 apresentou uniformidade da distribuição de cascalho ao longo do perfil, com teores inferiores a 0,6 % (Tabela 6).

No P06, foi observado uma diminuição das frações areia e silte e, conseqüentemente, um aumento da fração argila no horizonte Bivn, resultando numa notável diminuição da relação silte/argila. Mesmo levando em consideração os outros horizontes, o P06 apresentou, em média, os menores valores de relação silte/argila dentre os perfis do Recôncavo Baiano (Tabela 6). Além disso, apresentou maiores valores de COLERod e de ASEa (Tabela 6).

## **Características mineralógicas**

### ***Frações areia e silte***

O quartzo é a fase mineral predominante nas frações areia e silte de todos os perfis (Figura 2, 3). Na fração areia, foi ainda identificada a presença de feldspatos, em todos os perfis, e traços de caulinita nos horizontes intermediários e inferiores dos P05 e P06 (Figura 2).

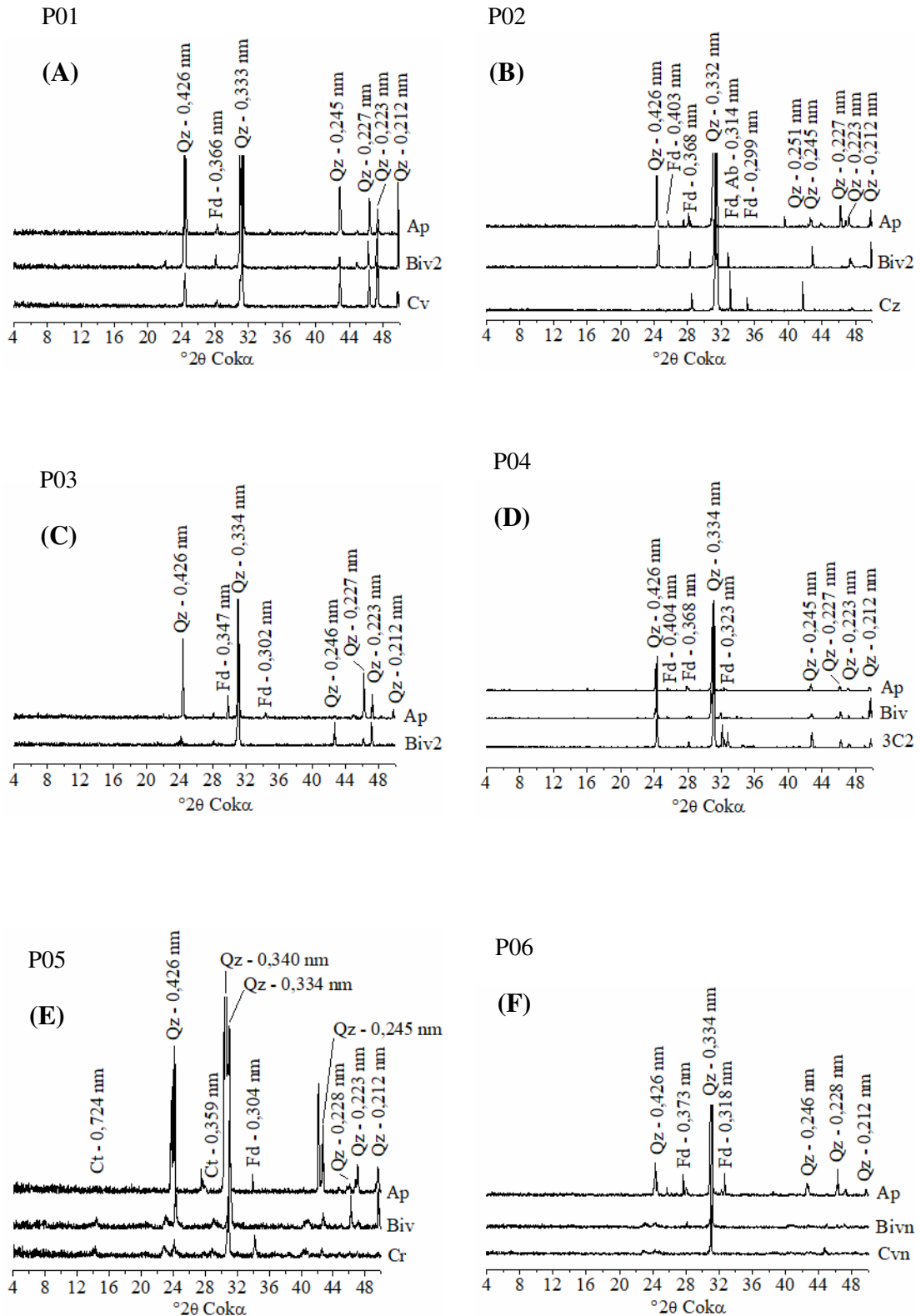


Figura 2. Difratoformas de raios-X da fração areia dos horizontes superficial, intermediário e mais profundo dos Vertissolos do Estado da Bahia (Ct-caulinita; Fd-feldspato; Qz-quartzo).

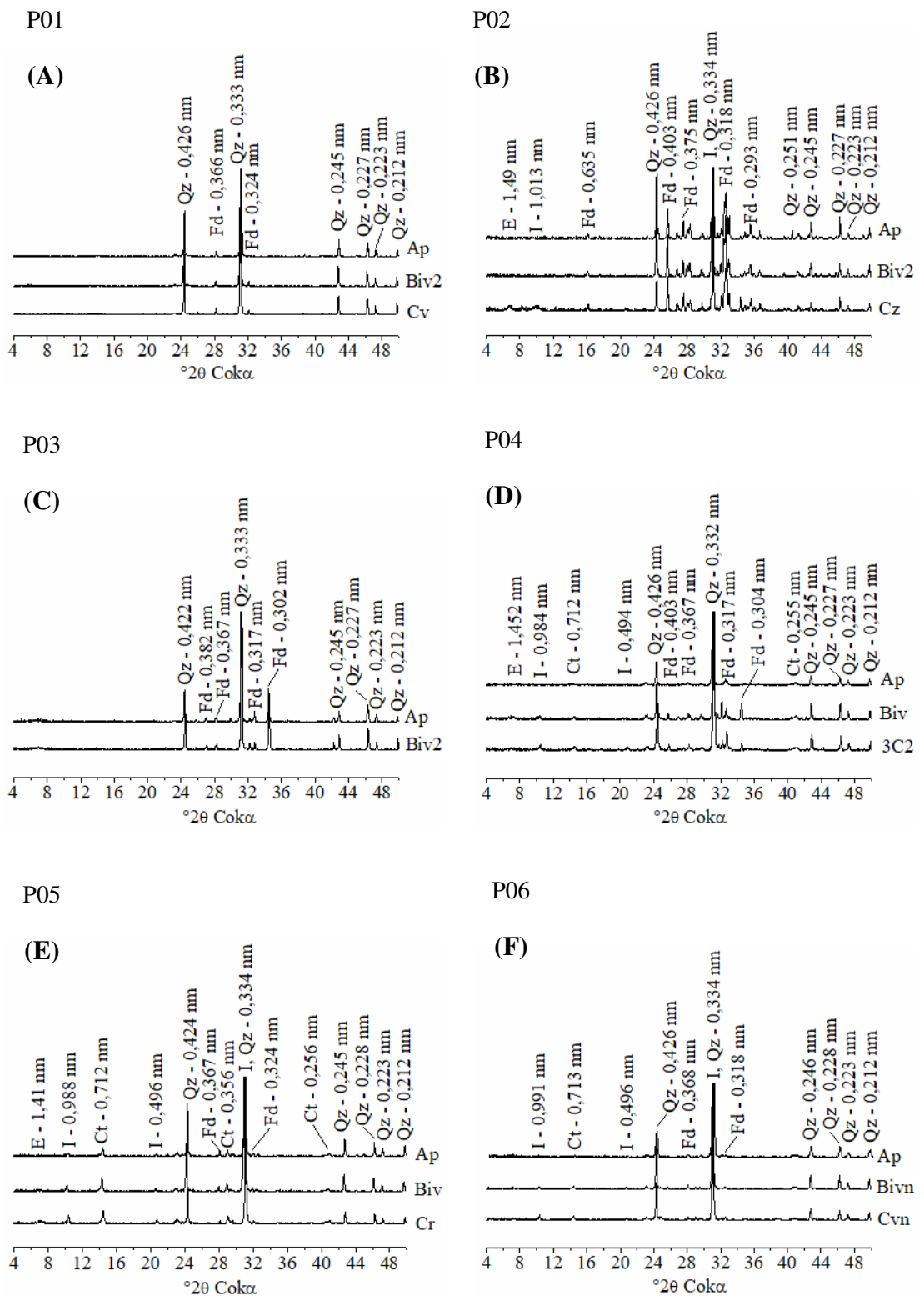


Figura 3. Difratoigramas de raios-X da fração silte dos horizontes superficial, intermediário e mais profundo dos Vertissolos do Estado da Bahia (Ct-caulinita; E-esmectita; Fd-feldspato; I-ilita; Qz-quartzo).

Na fração silte dos Vertissolos do Semiárido, a presença de feldspatos é mais expressiva no P02 e menos expressiva no P01 (Figura 3A,B). Para o P02, foi ainda observado traços de esmectita e ilita no horizonte Cz (Figura 3B).

Para os Vertissolos do Recôncavo, a presença de feldspatos foi mais expressiva nos P04 e P05, sendo observado apenas traços deste mineral no P06. Foram identificados ainda traços de ilita, em todos os perfis (Figura 3C,D,E), e de caulinita e esmectitas nos perfis P04 e P05 (Figura 3C,D).

### ***Fração argila***

Todos os solos estudados apresentaram composições mineralógicas semelhantes entre os respectivos horizontes superficiais, intermediários e mais profundos (Figura 4, 5). Os difratogramas da fração argila do P01 apresentaram picos de caulinita mais pronunciados do que os das demais fases mineralógicas (Figura 4A), sugerindo a predominância deste argilomineral. Foram ainda identificados, para este perfil, a presença de ilita e traços de esmectita (Figura 4A). Mesmo apresentando picos de baixa intensidade, é possível observar a expansão das esmectitas para 1,8 nm com o tratamento Mg-Gl, assim como a contração para 1,0 nm com o tratamento Li270 (Figura 6A). Porém, em nenhum dos casos, ouve uma alta relação pico/vale, indicando a predominância de argilominerais 2:1 com baixo grau de cristalinidade (Resende et al., 2005).

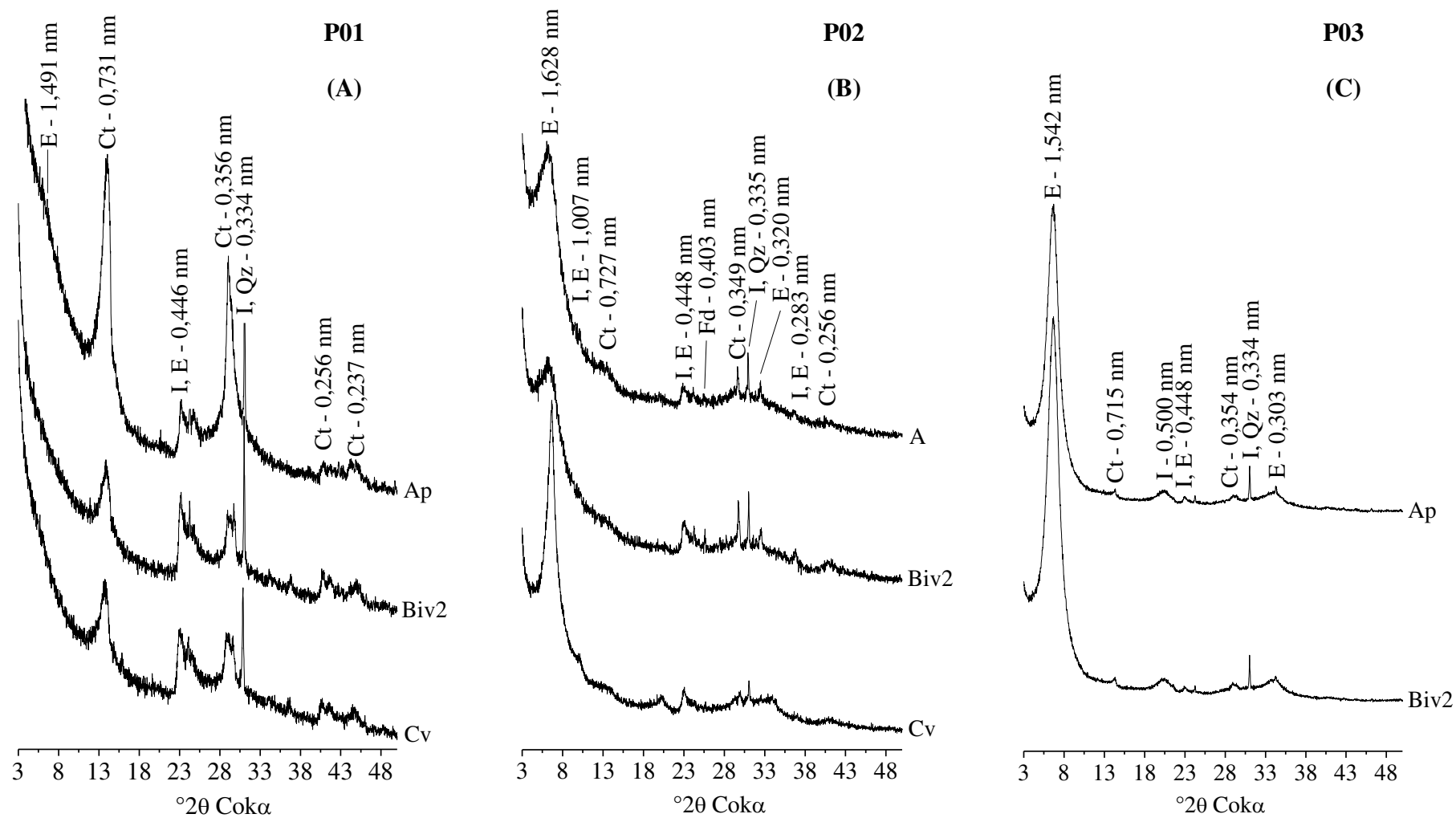


Figura 4. Difratomogramas de raios-X da fração Argila sem tratamento (natural) dos horizontes superficial, intermediário e mais profundo dos Vertissolos da região Semiárida (Ct-caulinita; E-esmectita; Fd-feldspato; I-ilita; Qz-quartzo)

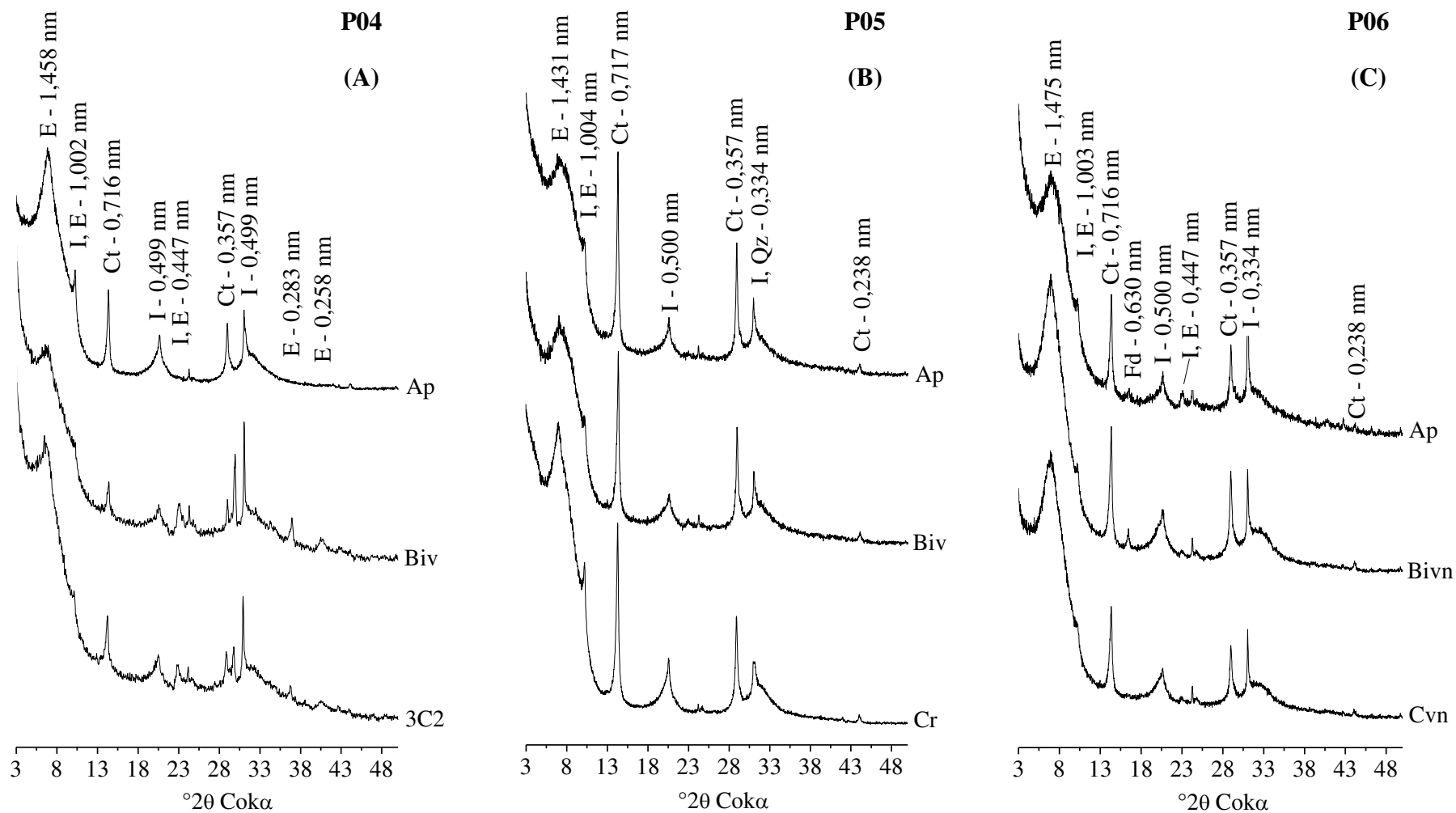


Figura 5. Difratoformas de raios-X da fração Argila sem tratamento (natural) dos horizontes superficial, intermediário e mais profundo dos Vertissolos do Recôncavo (Ct-caulinita; E-esmectita; Fd-feldspato; I-ilita; Qz-quartzo)

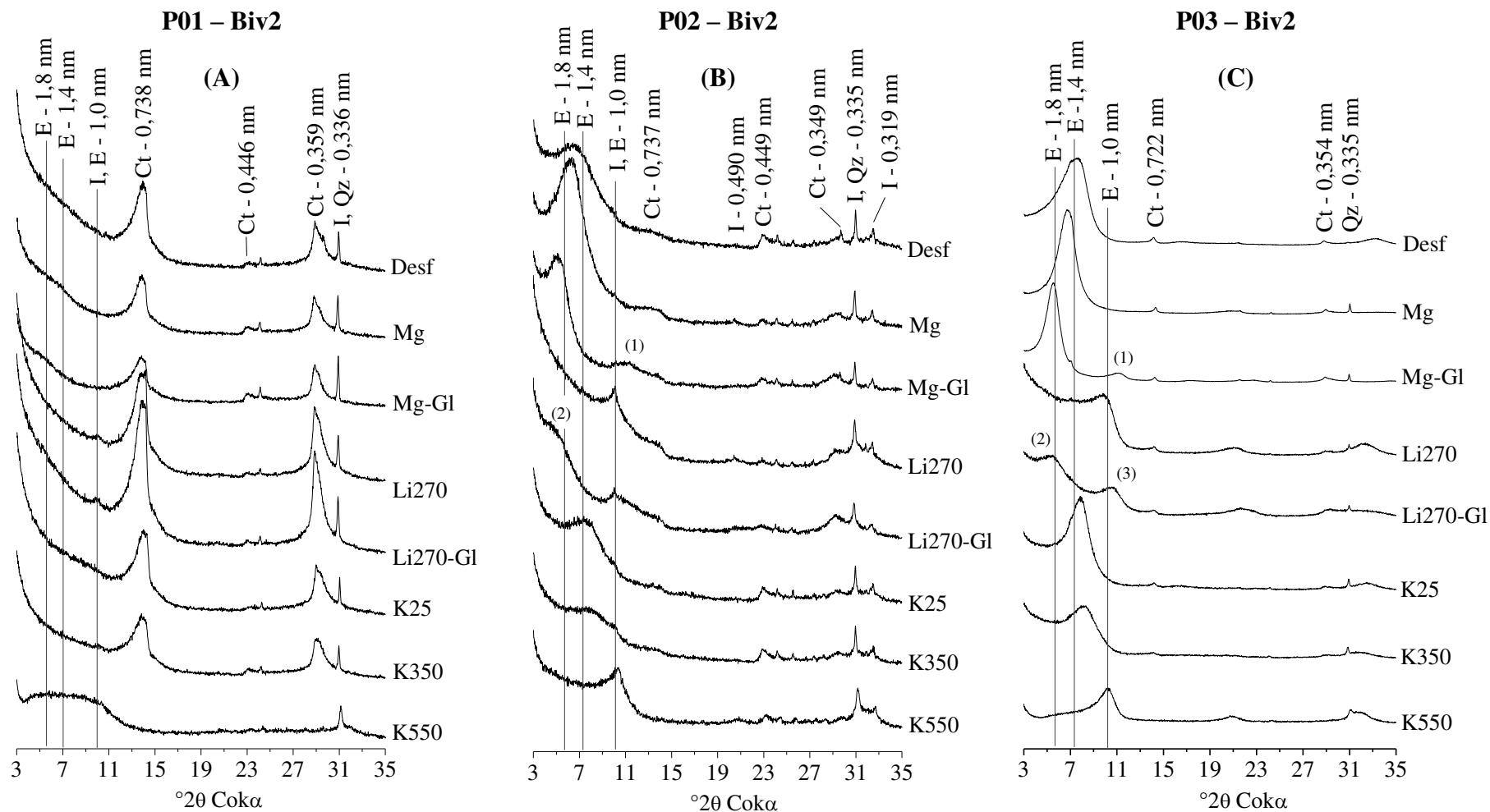


Figura 6. Difratoigramas de raios-X da fração argila desferrificada dos horizontes diagnósticos dos Vertissolos da região Semiárida (E-esmectita; I-ilita; Ct-caulinita; Qz-quartzo). <sup>(1)</sup>montmorilonita (Mt),  $d = 0,900$  nm; <sup>(2)</sup>beidelita/nontronita,  $d = 1,8$  nm <sup>(3)</sup>Mt,  $d = 0,950$  nm.

Observa-se ainda, no P01, uma resistência à contração para 1,0 nm com o tratamento K550 (Figura 6A), o que sugere a presença de argilominerais 2:1 com hidróxido entre camadas.

Para os demais perfis do Semiárido (P02 e P03), a esmectita é predominante, havendo apenas traços de illita e caulinita. Foi observado também, para estes dois perfis, a formação de picos em 1,0 e 1,8 nm com o tratamento Li270-G1 (Figura 6B,C), indicando a presença de montmorilonita e beidelita/nontronita (Greene-Kelly, 1953).

Para os Vertissolos do Recôncavo (P04, P05 e P06), foi identificada a presença de esmectitas, caulinita e illita, tendo os dois primeiros apresentado picos de maior intensidade (Figura 7). Os picos de caulinita observados nos difratogramas das argilas naturais dos solos do Recôncavo apresentam ainda uma menor largura a meia altura, quando comparados aos picos de caulinita do P01, o que sugere uma maior cristalinidade. Quando submetidas ao tratamento Li270-G1, as esmectitas permaneceram contraídas em 1,0 nm, indicando a predominância de montmorilonita, dentre as esmectitas, para os três perfis do Recôncavo.

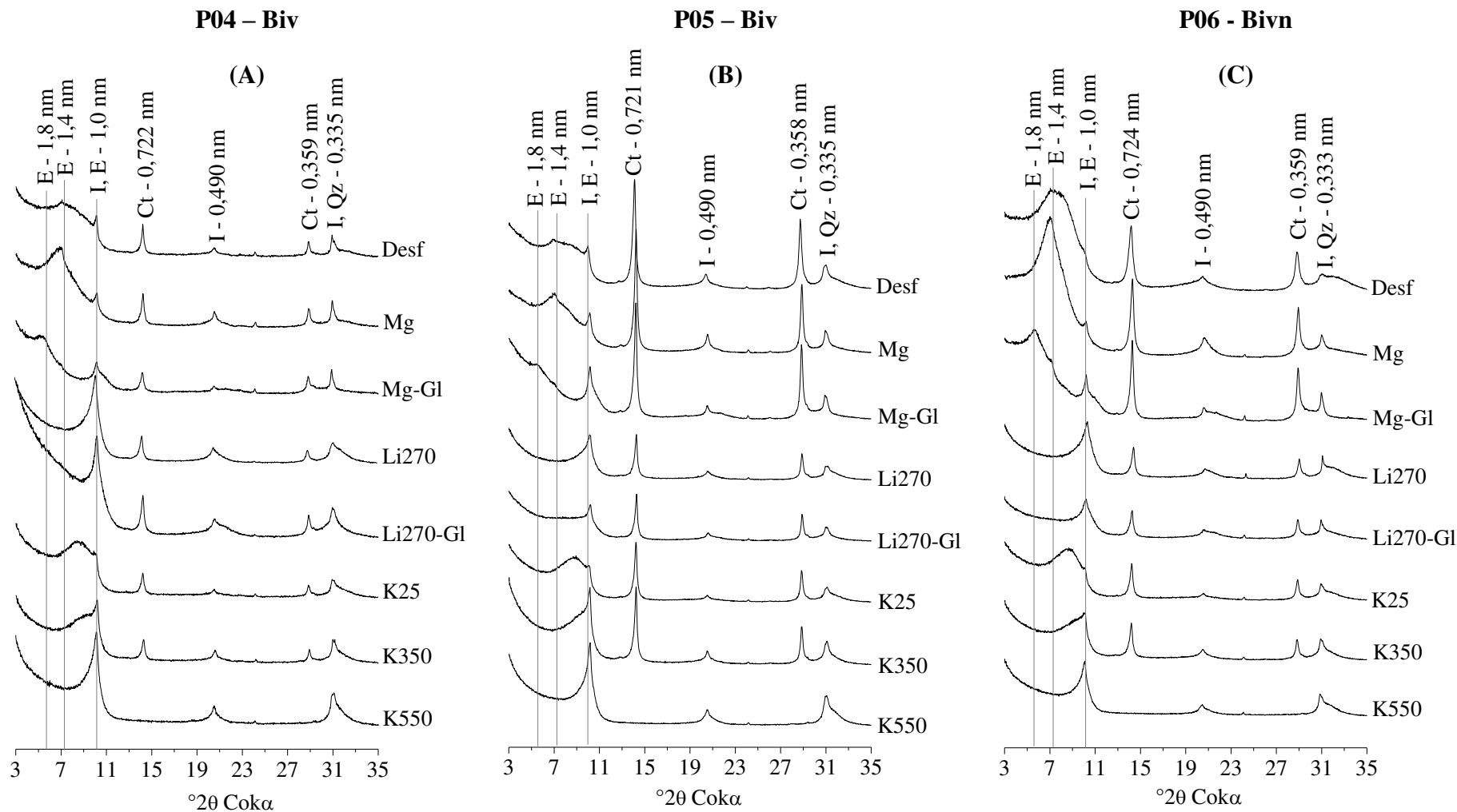


Figura 7. Difratoigramas de raios-X da fração argila desferriificada dos horizontes diagnósticos dos Vertissolos do Recôncavo (E-esmectita; I-ilita; Ct-caulinita; Qz-quartzo).

## DISCUSSÃO

### Vertissolos da região Semiárida

Os Vertissolos situados na região Semiárida apresentaram características físicas, químicas e mineralógicas que sugerem estágios de intemperismo diferentes. O P03, situado mais ao sul, apresenta mineralogia típica de solos pouco intemperizados (Pal et al., 2012), composta quase exclusivamente por esmectitas (Figura 4C). Esta composição mineralógica é refletida nos maiores valores de ASEa e no maior potencial de expansão, evidenciado pelos maiores valores de COLERod (Tabela 6), mesmo não sendo o perfil mais argiloso.

O P03 é o único perfil com caráter hipocarbonático, o que indica menor presença de água e menor drenagem interna deste solo (Pal et al., 2012). Estas condições também diminuem a taxa de lixiviação de elementos como Si, Ca e Mg, que, quando em altas concentrações, aumentam a estabilidade das esmectitas no solo (Ahmad, 1983; Pal et al., 2012). A menor taxa de lixiviação de Si no P03 é indicada pelos maiores valores de Ki e Kr dos horizontes A e B, quando comparados aos valores dos P01 e P02 (Tabela 4).

Numa posição intermediária, o P02 também apresenta a predominância de esmectitas na composição mineral da fração argila, no entanto com presença mais forte de caulinita nos horizontes A e Biv2 (Figura 4B), se comparado ao P03 (Figura 4C). A presença de caulinita nos horizontes mais superficiais e o aumento dos teores de carbonato equivalente e Na<sup>+</sup> em profundidade, indicam maior intemperismo do solo em superfície. Os horizontes A e Biv2, apresentaram ainda valores de Ki, Kr (Tabela 4) e ASEa (Tabela 6) menores do que os do P03, sugerindo que o P02 sofreu maior intemperismo.

O P01, mais ao norte, é o perfil que mostra sinais mais evidentes de maior estágio de intemperismo. Os valores de Ki inferiores a 2,9, apresentados pelo P01 (Tabela 4), estão aquém dos comumente relatados para Vertissolos esmectíticos no Brasil (Jacomine et al., 1972; Lemos et al., 1973; Corrêa et al., 2003; Kloster et al., 2013). Contudo, valores entre 2,12 e 2,92 foram relatados para Vertissolos ricos em caulinita (Lima, 2014; Marques et al., 2014), o que indica a forte presença deste argilomineral no P01.

A predominância de caulinita no P01 é também indicada pelos comportamentos dos picos de difração da fração argila (Figura 4A, 6A), em que foram observados apenas

traços de esmectitas e illita. Além da diminuição do Ki, o predomínio da caulinita proporcionou os menores valores de Kr (Tabela 4), ASEa e COLERod (Tabela 6), mesmo sendo o P01 o mais argiloso da região Semiárida.

A composição mineralógica das frações silte (Figura 3A) e areia (Figura 2A) também corroboram o maior grau de intemperismo do P01. Estas frações são compostas quase exclusivamente por quartzo, apresentando picos de feldspato com menores frequência e expressividade do que os observados para os P02 (Figura 2B, 3B) e P03 (Figura 2C, 3C).

As diferenças observadas entre o P01 e os demais perfis da região Semiárida não seriam esperadas para Vertissolos formados sob mesmo material de origem, clima e relevo. Este comportamento pode estar relacionado com sua localização a cerca de 4 km do rio São Francisco, próximo a sua junção com o riacho do Tourão (Figura 1), o qual nasce e corre sobre a Formação Caatinga, onde são encontradas as principais áreas de Vertissolos do município de Juazeiro (Jacomine et al., 1979).

Deste modo, a gênese deste solo pode ter sido influenciada pelo aporte de materiais previamente intemperizados provenientes da Formação Vazantes (Inda e Barbosa, 1978), assim como pelos materiais pouco intemperizados transportados pelo riacho do Tourão. O aporte de materiais com estágios de intemperismo diferentes proporcionaria a este solo características de avançado estágio de intemperismo, para o esperado para Vertissolos, mas com quantidade de argilominerais 2:1 suficiente para promover os processos de expansão e contração e, conseqüentemente a formação de características vérticas. Por sua vez, estas características seriam preservadas devido a presença do clima semiárido e pelo alto teor de argila do P01, sendo esta uma condição favorável para a estabilidade dos argilominerais 2:1 (Ahmad, 1983; Pal et al., 2012).

### **Vertissolos do Recôncavo Baiano**

Os Vertissolos da região do Recôncavo apresentaram sinais de drenagem interna ineficiente, indicando que, mesmo sob um regime climático úmido, não há taxas de lixiviação adequada para intemperismo das esmectitas. Esta dificuldade de percolação de água ao longo perfil está provavelmente relacionada aos altos teores de argila (Tabela 6) herdados do material de origem pelítico.

Outros fatores também contribuem para a diminuição da drenagem, como o relevo local plano ou plano abaciado em que se encontram o P06 e o P04, respectivamente. Nestas condições de relevo o acúmulo de Si e bases no solo é favorecido, contribuindo para a diminuição do intemperismo das esmectitas (Ahmad, 1983; Pal et al., 2012). Sinais de má drenagem no P06 são mais evidentes no horizonte C<sub>vn</sub>, em que, além de ocorrer um acúmulo de Na<sup>+</sup> (Tabela 3), apresenta coloração esverdeada (Tabela 2), sendo um indicativo de acúmulo sazonal de água (Bispo et al., 2011).

No caso do P04, o relevo plano abaciado favoreceu o acúmulo de bases (Tabela 3) e Si (Tabela 4) no horizonte superficial, sendo este o que apresenta maiores valores de K<sub>i</sub> (Tabela 4), de COLE<sub>rod</sub> e de ASE<sub>a</sub> (Tabela 6). Observa-se ainda que o pico de esmectitas do horizonte A<sub>p</sub> do P04 é mais pronunciado se comparado aos demais horizontes (Figura 5A), indicando que o acúmulo de bases e Si está colaborando para a estabilidade das esmectitas em superfície, mesmo sob clima úmido. A drenagem ineficiente deste solo dificultou ainda a dissolução de carbonatos (Tabela 3), principalmente nos horizontes subsuperficiais, o que não é esperado para solos em áreas com altas taxas de precipitação.

Em condições de relevo ondulado, como no caso do P05, a contínua perda do material superficial do solo por erosão hídrica é facilitada (Ahmad, 1983), o que contribui para a diminuição da profundidade em que se encontra o horizonte Cr. A aproximação deste horizonte ou do material de origem à superfície dificulta a drenagem interna do solo, devido à estratificação horizontal dos folhelhos (Menezes et al., 2011), o que tende a aumentar ainda mais a percolação superficial da água das chuvas. Deste modo, é criada uma dinâmica de constante rejuvenescimento do solo.

No P05, a maior percolação de água na camada superficial do solo formou características contrastantes entre esta camada e a mais profunda. Abaixo de cerca de 40 cm de profundidade, este solo apresenta uma clara transição para um estágio de intemperismo inferior, com uma marcante presença do material de origem, onde é possível observar a estrutura do folhelho em alguns fragmentos no horizonte Cr. Acima desta profundidade, a presença do material de origem é quase inexistente, porém há um aumento de aproximadamente dez vezes na porcentagem de areia (Tabela 6). Isto indica que houve uma intemperização do folhelho, reduzindo-os para partículas do tamanho de areia, o que pode ser confirmado pela presença de traços de caulinita e feldspato em sua composição (Figura 3D).

É possível ainda notar os contrastes destas camadas em alguns atributos químicos, como a aumento abrupto, após a profundidade de 40 cm, nos valores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{Na}^+$  trocáveis, P assimilável, CTC total, soma de bases, carbono orgânico (Tabela 3) e a relação molecular Ki (Tabela 4), todos indicando maior lixiviação e intemperização dos horizontes superiores. O único nutriente que aumenta em superfície é o  $\text{K}^+$  (Tabela 3), provavelmente fruto do efeito capilar ou mesmo do constante intemperismo dos feldspatos (Pal et al., 2012; Ferreira et al., 2016). Os altos teores de P apresentados pelo P05, em seus horizontes mais profundos, podem estar relacionados com a influência marinha na formação do seu material de origem. Teores elevados de fosfato foram observados em arenitos da Formação Candeias, representando cerca de 8 % dos constituintes primários desta rocha, sendo atribuídos à presença comum de escama e ossos de peixes (Brandão, 2015).

O P06 apresentou maior uniformidade ao longo do perfil, exceto pelo acúmulo de argila no horizonte Bivn (Tabela 6), o que não é comum em Vertissolos, devido aos processos de pedoturbação. Porém este comportamento é já foi relatado para Vertissolos em estágio de acidificação (Pal et al., 2012), como observado no P06, pelo acúmulo de  $\text{Al}^{3+}$  e pelos baixos valores de pH em água e P remanescente (Tabela 3). Os teores de  $\text{Al}^{3+}$  trocável observados neste perfil podem estar relacionados à dissolução de compostos de baixo grau de cristalinidade, em que este elemento seria liberado das camadas octaédricas dos argilominerais 2:1, devido à ação do extrator  $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ . Comportamento semelhante foi observado em solos da região amazônica, em que as condições climáticas de alta temperatura e umidade favoreceram a acidificação destes solos, tornando os argilominerais 2:1 termodinamicamente instáveis em níveis de pH próximos a 5,0 (Almeida et al., 2010).

O comportamento dos picos de difração da fração argila dos P05 e P06 sugere maior formação de caulinita em direção à superfície. Nos difratogramas das argilas sem tratamento (Figura 5B,C), é possível ver a diminuição da intensidade dos picos de caulinita com o aprofundamento do perfil, quando comparados aos picos de esmectita dos respectivos horizontes. Outras características corroboram esta afirmação, como a diminuição da dos valores de Ki e da ASEa, em direção à superfície (Tabela 6).

Este comportamento pode estar relacionado com as altas taxas pluviométricas da região que, mesmo de forma lenta, contribuíram para uma maior perda de Si e bases destes solos em superfície, facilitando a formação de caulinita. Por outro lado, os traços de

caulinita observados na composição mineralógica da fração areia do P05 indicam que parte deste argilomineral pode ter sido herdada do material de origem. Estes fatos sugerem que a caulinita presente nos Vertissolos do Recôncavo pode ser tanto neogênica quanto herdada do material de origem, embora não esteja claro qual via de formação seja predominante.

## CONCLUSÕES

- Os Vertissolos do Semiárido apresentam diferenças no estágio de intemperismo, sendo mais intemperizados a medida que se aproximam do rio São Francisco.
- O Vertissolo mais próximo ao rio São Francisco apresentou mineralogia predominantemente caulínica, com um baixo teor de esmectita, o que está provavelmente relacionado com a influência da Formação Vazantes, pelo aporte de material previamente intemperizado.
- O baixo teor de esmectitas do perfil mais próximo ao rio São Francisco foi suficiente para promover a formação das características vérticas, as quais resultam dos processos de expansão e contração.
- A gênese de Vertissolos do Recôncavo, mesmo sob clima úmido, deve-se à granulometria muito fina e à estratificação horizontal do material de origem pelítico, que dificultam a percolação de água no perfil, diminuindo a taxa de intemperismo.
- O relevo plano abaciado promoveu acúmulo de Si e bases em superfície, colaborando para a estabilidade das esmectitas no horizonte superficial do P04.
- A maior presença de caulinita em superfície, nos P05 e P06, indica que as altas taxas pluviométricas da região podem estar contribuindo para a neoformação deste mineral.
- O P05, situado em relevo local ondulado, apresentou horizonte B menos profundo do que os dos perfis em relevo plano (P04 e P06), com marcante presença do material de origem abaixo dos 40 cm de profundidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad N. Vertisols. In: Wilding LP, Smeck NE, Hall GF, organizadores. Pedogenesis Soil Taxon II Soil Orders Dev Soil Sci 11B. Amsterdam: Elsevier; 1983. p. 91–123.
- Almeida JA, Campos ML, Ferreira ERN, Gatiboni LC. Formas de alumínio em solos do Acre. Pesquisas coligadas da 9ª Reun Bras Correlação e Classif Solos; solos sedimentares em Sist Amaz potencialidades e demandas Pesqui. Rio Branco: Embrapa, UFRRJ, Governo do Acre; 2010. p. 38–50.
- Almeida BG de, Donagemma GK, Ruiz HA, Braidia JA, Viana JHM, Reichert JMM, Oliveira LB, Ceddia MB, Wadt PS, Fernandes RBA, Passos RR, Dechen SCF, Klein VA, Teixeira WG. Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2013. p. 11.
- Alvarez V. VH, Novaes RF, Dias LE, Oliveira JA. Determinação e uso do fósforo remanescente. Bol Inf da Soc Bras Ciência do Solo. 2000;25:25–32.
- Araújo Filho JC de, Burgos N, Lopes OF, da Silva FHBB, Medeiros LAR, de Melo Filho HFR, Parahyba R da BV, Cavalcanti AC, de Oliveira Neto MB, Silva FBR e, Leite AP, dos Santos JCP, de Sousa Neto NC, da Silva AB, da Luz LRQP, de Lima PC, Reis RMG. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco. Recife: Embrapa Solos; 2000. p. 382.
- Bardales NG. Gênese, morfologia e classificação de solos do baixo vale do rio Iaco, Acre, Brasil. Universidade Federal de Viçosa; 2005.
- Bispo FHA, Silva AC, Torrado PV. Highlands of the upper Jequitinhonha valley, Brazil: I - characterization and classification. Rev Bras Ciência do Solo. 2011;35:1069–1080.
- Brandão AT. Sedimentologia e estratigrafia dos turbiditos lacustres da Formação Candeias no nordeste da Bacia do Recôncavo, Bahia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2015.
- Corrêa MM, Ker JC, Mendonça ES, Ruiz HA, Bastos RS. Atributos físicos químicos e mineralógicos de solos da região das várzeas de Sousa. Rev Bras Ciência do Solo. 2003;27:311–324.
- Coulombe CE, Dixon JB, Wilding LP. Mineralogy and chemistry of Vertisols. In: Ahmad N, Mermut AR, organizadores. Vertisols Technol their Manag Dev soil Sci 24. Amsterdam: Elsevier Science; 1996. p. 115–200.
- Debele T, Deressa H. Integrated Management of Vertisols for Crop Production in Ethiopia: A Review. J Biol Agric Healthc. 2016;Vol.6:26–36.
- Defilippo B V., Ribeiro AC. Análise química do solo - metodologia. 2ª edição. Viçosa: Editora UFV; 1997.
- Donagemma GK, Campos DVB de, Calderano SB, Teixeira WG, Viana JHM. Manual de métodos de análise de solo. 2ª edição. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2011.
- Dudal R. Dark clay soils of tropical and subtropical regions (Agricultural Development Paper 83). Rome: FAO - Agriculture Development Paper; 1965.
- Ferreira EP, Anjos LHC dos, Pereira MG, Valladares GS, Cipriano-Silva R, Azevedo AC de. Genesis and Classification of Soils Containing Carbonate on the Apodi Plateau, Brazil. Rev Bras Ciência do Solo. 2016;40:1–20.
- Greene-Kelly R. The identification of montmorillonoids in clays. J Soil Sci. 1953;4:232–237.
- Harris W, White GN. X-ray diffraction techniques for soil mineral identification. In: Ulery AL, Dress LR, organizadores. Methods soil Anal part 5 - Mineral methods. Madison: Soil Science Society of America; 2008. p. 81–115.

- Inda HAV, Barbosa JF. Texto explicativo para o mapa geológico do Estado da Bahia - escala 1:1.000.000. Salvador: Coordenação da Produção Mineral, Secretaria de Minas e Energia, Governo do Estado da Bahia; 1978.
- Jacomine PKT, Cavalcanti AC, Silva FBR e, Montenegro JO, Formiga RA, Mélo Filho HFR de. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos da margem direita do rio São Francisco; Estado da Bahia (vol. 2). Recife: Embrapa, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos; 1979. p. 549.
- Jacomine PKT, Ribeiro MR, Montenegro JO, Silva AP da, Melo Filho HFR de. Levantamento exploratório e reconhecimento dos solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, SUDENE; 1972. p. 686.
- JCPDS - Joint Committee on Powder Diffraction Standards. Selected powder diffraction data for minerals. Park Lane: Joint Committee on Powder Diffraction Standards; 1974.
- Kloster AC, Melo AWF de, Schaefer CEGR, Masutti CSM, Salimon CI, Oliveira CV de, Araújo EA de, Amaral EF do, Amaral EF do, Costa F de S, Oliveira H de. Guia de campo da IX reunião brasileira de classificação e correlação de solos: solos sedimentares em sistemas amazônicos - potencialidades e demandas de pesquisa. IX Reun Bras Classif e correlação solo. Brasília: Embrapa; 2013. p. 206.
- Lemos RC, Azolim MAD, Abrão PUR, Santos MCL dos. Reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife: Ministério da Agricultura, SUDENE; 1973. p. 482.
- Lima GK. Caracterização dos Vertissolos do Nordeste brasileiro. Universidade Federal Rural de Pernambuco; 2014.
- Marques FA, Souza RA da S, Souza JES de, Lima JFWF, Souza Junior VS de. Caracterização e classificação de Vertissolos da Ilha de Fernando de Noronha (PE). Rev Bras Ciência do Solo. 2014;38:1051–1065.
- Menezes AA, Costa LM da, Moreau AMS dos S, Moreau MS. Interrelações entre a profundidade do solo e o substrato geológico na região centro-leste de Minas Gerais. Rev Ceres. 2011;58:794–801.
- Murphy J, Riley JP. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal Chim Acta. 1962;27:31–36.
- Oakes H, Thorp J. Dark-clay Soils of Warm Regions Variously Called Rendzina, Black Cotton Soils, Regur, and Tirs. Soil Sci Soc Am J. Soil Science Society of America; 1951;15:347.
- Pal DK, Wani SP, Sahrawat KL. Vertisols of tropical Indian environments: Pedology and edaphology. Geoderma. 2012;189–190:28–49.
- Pansu M, Gautheyrou J. Mineralogical characterisations by X-ray diffractometry. In: Pansu M, Gautheyrou J, organizadores. Hand B soil Anal - Mineral Org Inorg methods. New York: Springer; 2006. p. 83–131.
- Quirk JP. Significance of surface areas calculated from water vapor sorption isotherms by use of the B.E.T. equation. Soil Sci. 1955;80:423–430.
- Resende M, Curi N, Ker JC, Rezende SB. Mineralogia de solos brasileiros - interpretações e aplicações. 1ª edição. Lavras: Editora UFPA; 2005.
- Santos HG dos, Jacomine PKT, dos Anjos LHC, Oliveira VÁ, Lmbreras JF, Coelho MR, de Almeida JA, Cunha TJF, de Oliveira JB. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (3ª edição ampliada). 3º ed. Brasília: Embrapa; 2013.
- Schafer WM, Singer MJ. A new method of measuring shrink-swell potential using soil pastes. Soil Sci Soc Am J. 1976;40:805.
- Silva FBR e, Santos JCP dos, Araújo Filho JC de, Gomes IA, Santos RD dos. V reunião de cassificação, correlação e aplicação de levantamento de solos. Rio de Janeiro: Embrapa -

CNPS; 1998. p. 129.

Whittig LD, Allardice WR. X-Ray Diffraction Techniques. In: Klute A, organizador. *Methods soil Anal part 1 Phys Mineral methods*. Madison: American Society of Agronomy; 1986. p. 331–362.

Wubie AA. Review on Vertisol management for the improvement of crop productivity in Ethiopia. *J Biol Agric Healthc*. 2015;5:92–102.

Yeomans JC, Bremner JM. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil 1. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 1988;19:1467–1476.

Yerima BPK, Calhoun FG, Senkayi AL, Dixon JB. Occurrence of interstratified kaolinite-smectite in El Salvador Vertisols. *Soil Sci Soc Am J*. 1985;49:462.

Yerima BPK, Wilding LP, Calhoun FG, Hallmark CT. Volcanic ash-influenced Vertisols and associated Mollisols of El Salvador: physical, chemical, and morphological properties. *Soil Sci Soc Am J*. 1987;51:699.

Yousif AA, Mohamed HHA, Ericsson T. Clay and iron minerals in soils of the clay plains of Central Sudan. *J Soil Sci*. 1988;39:539–548.

## Capítulo 2

# CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE VERTISSOLOS DO ESTADO DA BAHIA

### RESUMO

A existência de Vertissolos com codominância ou predominância de caulinita são relatadas em diversas partes do mundo, no entanto, são escassos os estudos que buscam investigar a influência deste argilomineral nas características geotécnicas destes solos. Este trabalho teve como objetivo realizar a caracterização geotécnica de Vertissolos do Estado da Bahia, Brasil, além de analisar a influência dos atributos químicos, físicos e mineralógicos no comportamento geotécnico destes solos. Para este estudo, foram selecionados seis Vertissolos, sendo três no município de Juazeiro, na região Semiárida, e três na região do Recôncavo. A caracterização geotécnica dos solos selecionados foi realizada nos seus respectivos horizontes diagnósticos, determinando-se atributos como curva granulométrica, limites de Atterberg, atividade da argila, coeficiente de expansão linear, capacidade de compactação, coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) dos solos saturados. Foi observado que o potencial de expansão do solo não está relacionado apenas com altos teores de argilas expansivas, mas também pelo teor de argila presente em cada solo. A melhor eficiência na compactação do solo foi observada para o Vertissolo caulínico, que apresentou maior redução do índice de vazios e maior adensamento em função do aumento da umidade. Observou-se ainda, que a  $c$  aumentou com o aumento de caulinita e diminuiu com o aumento do teor de argila, para solos de mineralogia semelhantes. Por sua vez, o  $\phi$  foi mais influenciado pela granulometria, em que maiores teores de areia e cascalho proporcionaram maiores  $\phi$ , independentemente do tipo de argila presente.

Palavras-chave: Vertissolo; caulinita; solos expansivos.

### ABSTRACT

The existence of vertic soils with codominance or predominance of kaolinite is reported in several parts of the world, however, there are few studies that investigate the influence of this clay mineral in the geotechnical characteristics of these soils. The objective of this work was to perform a geotechnical characterization Vertisols of the state of Bahia, Brazil, besides understanding the influence of physical, chemical and mineralogical attributes on the geotechnical behavior of these soils. For this study, six Vertisols were selected, three in the municipality of Juazeiro, in the semi-arid region, and three in the Recôncavo region. A geotechnical characterization of the selected soils was carried out in its diagnostic horizons, determining attributes such as granulometric curve, Atterberg limits, clay activity, linear expansion coefficient, compaction capacity, cohesion ( $c$ ) and internal friction angle ( $\phi$ ) of saturated soils. It was observed that the soil expansion potential is related not only to high levels of expansive clays, but also to clay content in each soil. The best soil compaction efficiency was observed for the kaolinitic Vertisol, which presented greater reduction of void ratio and higher density as a function of moisture increase. It was also observed that  $c$  increased with increasing kaolinite and

decreased with increasing clay content for similar mineralogical soils. On the other hand,  $\phi$  was more influenced by granulometry, in which higher levels of sand and gravel provided higher  $\phi$ , independently of the type of clay.

Key words: Vertisol; kaolinite; expansive soils.

## INTRODUÇÃO

Características geotécnicas de solos expansivos têm sido estudadas em várias partes do mundo, devido, principalmente aos danos às construções civis causadas pelos processos de expansão e contração (Chen, 1988; Driscoll e Crilly, 2000; Hakari e Puranik, 2010, 2011; Paiva et al., 2016). O potencial de expansão destes solos está relacionado, principalmente à presença de argilominerais expansivos, como esmectitas, que, por sua vez, podem ainda interferir em outros parâmetros geotécnicos, como a coesão, o ângulo de atrito interno (Taha et al., 2000; Miao et al., 2002; Cokca et al., 2004; Rahardjo et al., 2004; Heping et al., 2005; Kumor, 2008; Ye et al., 2010; Adejumo et al., 2012) e a capacidade de compactação do solo (Gan et al., 1988; Ene e Okagbue, 2009; Gheorghe et al., 2013).

No Brasil, os Vertissolos ocorrem em áreas com relevo, clima ou material de origem propícios à gênese e conservação dos argilominerais expansivos, como o Semiárido nordestino e a região do Recôncavo Baiano, por exemplo. Os Vertissolos destas regiões apresentam características granulométricas bastante variadas, desde texturas média a muito argilosa (Jacomine et al., 1979; Lima, 2014). Quanto à mineralogia, além de solos com predominância de esmectita na fração argila, há ainda os que apresentem codominância de esmectita e caulinita e até mesmo o predomínio de caulinita (Lima, 2014), argilomineral não expansivo.

Solos expansivos ricos em caulinita são citados por vários estudos, em diversas regiões do mundo, como, por exemplo, em El Salvador (Yerima et al., 1985, 1987) e no Sudão (Yousif et al., 1988), no entanto, são escassos os estudos que buscam compreender a influência destes argilominerais nas características geotécnicas destes solos.

Para regiões do Semiárido e do Recôncavo, a compreensão da influência da mineralogia no comportamento geotécnico dos Vertissolos pode elucidar os processos de formação e conservação destes solos, investigando até que ponto a formação de argilominerais não expansivos interfere em sua expansividade. Ou mesmo se há

características físicas ou químicas que podem potencializar a capacidade de expansão destes solos, mesmo com predominância de caulinita.

Assim, este trabalho tem como objetivo realizar a caracterização geotécnica dos Vertissolos do Semiárido e do Recôncavo Baiano, além de compreender a influência de atributos químicos, físicos e mineralógicos no potencial de expansão, na capacidade de compactação, na coesão e no ângulo de atrito interno destes solos.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Solos selecionados e áreas de estudo

Para a realização do presente estudo foram selecionados seis solos residuais expansivos, sendo três no município de Juazeiro (P01, P02 e P03), na região Semiárida do Estado da Bahia, e três na região do Recôncavo (P04, P05 e P06) (Figura 1).

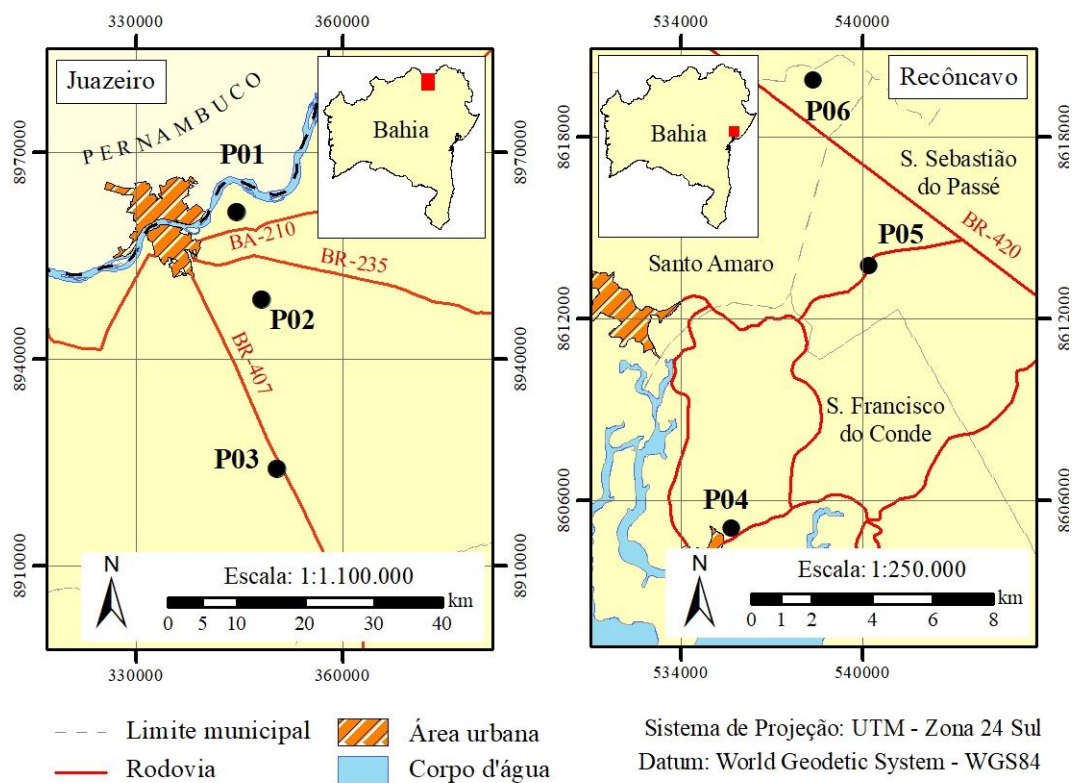


Figura 1. Localização dos perfis selecionados no município de Juazeiro, na região semiárida, e na região do Recôncavo.

Os solos situados na região Semiárida são formados a partir da alteração do material calcário da Formação Caatinga, em relevo plano, enquanto os do Recôncavo são

originários da alteração dos folhelhos cinza-esverdeados da Formação Candeias (Tabela 1), em relevo plano (P04 e P06) e ondulado (P05).

Tabela 1. Localização dos perfis, classificação e dados dos horizontes analisados e do meio físico.

Perfil	Coordenada geográfica	Classificação do solo*	Horiz.	Prof.	Geologia	Material de origem
P01	9° 23' 33"S 40° 24' 49"W	VXo típico endosalino	Biv2	cm 30-80	Formação Caatinga	Produto de alteração do calcário
P02	9° 30' 30" S 40° 22' 52" W	VXz solódico	Biv2	25-80	Formação Caatinga	Produto de alteração do calcário
P03	9° 43' 47"S 40° 21' 44"W	VXo típico hipocarbonático	Biv2	24-50+	Formação Caatinga	Produto de alteração do calcário
P04	12° 37' 05"S 38° 40' 18"W	VXo típico com carbonato	Biv	42-73	Formação Candeias	Folhelhos com lentes de calcário
P05	12° 32' 23"S 38° 37' 48"W	VXo típico	Biv	18-38	Formação Candeias	Folhelhos com lentes de calcário
P06	12° 29' 03"S 38° 38' 49"W	VXo solódico	Bivn	25-48	Formação Candeias	Folhelhos com lentes de calcário

\*Sistema Brasileiro de Classificação de Solos; Horiz. = horizonte analisado; Prof. = profundidade do horizonte analisado; VXo = VERTISSOLO HÁPLICO Órtico; VXz = VERTISSOLO HÁPLICO Sáfico.

Os solos selecionados foram classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013) (Tabela 1), por meio da caracterização morfológica, física e química dos perfis.

A caracterização geotécnica foi realizada nos horizontes diagnósticos mais expressivos de cada solo (Tabela 1), com atributos físicos (Tabela 2), químicos (Tabela 3) e mineralógicos (Tabela 4) previamente caracterizados. Todos os horizontes selecionados apresentaram características vérticas, como formação de estrutura prismática, fendas e *slickensides*.

Tabela 2. Características físicas dos Vertissolos do Estado da Bahia

Perfil	ASEa	ASEs	$\delta a$
	m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>		g cm <sup>-3</sup>
P01	95,19	1,98	2,68
P02	159,37	0,18	2,68
P03	238,46	17,79	2,74
P04	99,41	28,93	2,73
P05	124,88	18,38	2,75
P06	155,93	28,69	2,77

ASEa = área superficial específica da argila; ASEs = área superficial específica do silte, ambas determinadas por saturação por vapor de água (Quirk, 1955);  $\delta a$  = massa específica dos grãos do solo (<2,0 mm) (ABNT, 1984b).

Tabela 3. Características químicas dos Vertissolos do Estado da Bahia

Perfil	pH		P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al
	Água	KCl	mg dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>					
P01	8,0	6,4	1,70	27,17	3,32	0,08	0,46	0,00	0,80
P02	7,87	6,51	9,10	28,62	4,58	0,24	4,37	0,00	0,70
P03	8,30	6,82	0,30	55,44	4,90	0,04	0,22	0,00	0,70
P04	8,21	6,97	64,70	31,73	6,77	0,09	0,12	0,00	1,20
P05	6,44	5,02	27,50	19,53	9,59	0,40	0,09	0,00	4,10
P06	5,23	3,58	1,10	19,69	12,67	0,20	0,31	10,70	16,30

Perfil	SB	T	V	m	PST	COT	Carb. eq.	P-rem
	— cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> —		%		dag kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	
P01	31,03	31,83	97,50	0,00	1,44	0,41	4,62	21,50
P02	37,81	38,51	98,20	0,00	11,35	0,47	9,19	40,40
P03	60,61	61,31	98,90	0,00	0,37	0,75	80,65	26,00
P04	38,71	39,91	97,00	0,00	0,30	0,63	33,49	23,50
P05	29,61	33,71	87,80	0,00	0,25	1,30	1,00	29,30
P06	32,87	49,17	66,80	24,60	0,63	0,85	0,00	7,40

pH em água e em KCl - Relação 1:2,5; P, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> - Extrator Mehlich 1; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> - Extrator: KCl - 1 mol/L; H+Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0; SB = Soma de Bases Trocáveis; T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V = Índice de Saturação de Bases; m = Índice de Saturação de Alumínio; COT = carbono orgânico total - Walkley-Black; Carb. eq. = carbonato de cálcio equivalente; P-rem = fósforo remanescente.

Tabela 4. Composição mineralógica das frações argila, silte e areia dos Vertissolos do Estado da Bahia

Perfil	Argila		Silte		Areia	
	Fase dominante	Outras fases identificadas	Fase dominante	Outras fases identificadas	Fase dominante	Outras fases identificadas
P01	Ct	Mt, E-OH, I	Qz	Fd	Qz	Fd
P02	E (Mt, B/N)	I, Ct, Fd	Qz	Fd	Qz	Fd
P03	E (Mt, B/N)	Ct, I	Qz	Fd	Qz	Fd
P04	E (Mt), Ct	I	Qz	Fd, I, Ct, E	Qz	Fd
P05	E (Mt), Ct	I	Qz	Fd, I, Ct, E	Qz	Fd, Ct
P06	E (Mt), Ct	I	Qz	Fd, I, Ct	Qz	Fd, I

E = esmectita; Mt = montmorilonita; B/N = beidelita/nontronita; E-OH = esmectita com hidróxi entre camadas; I = Ilita; Ct = caulinita; Fd = feldspato; Qz = quartzo.

## Caracterização geotécnica

### *Curva granulométrica*

Para a obtenção da curva granulométrica (ABNT, 1984d), as amostras de solos deformadas foram passadas em peneira com abertura de malha de 2,0 mm de diâmetro, separando a terra fina (<2,0 mm) dos cascalhos (>2,0 mm). Os cascalhos foram separados em sete classes por meio de peneiramento em agitador mecânico, utilizando-se peneiras com aberturas de malha de 50, 37,5, 25, 19, 9,5, e 4,75 mm, sendo suas massas determinadas após secagem em estufa a 105 °C por 24 horas.

Para a determinação dos teores de areia, silte e argila, amostras de 70 g de terra fina foram dispersadas química e fisicamente, por meio da agitação das amostras em agitador elétrico “stirrer” por 15 minutos com 125 mL de hexametáfosfato de sódio (0,078 mol/L). Após a agitação, as amostras foram passadas em peneira de com abertura de malha de 0,075 mm, separando as frações mais grossas da areia do restante da amostra. As partículas maiores que 0,075 mm foi ainda subdividida por meio de peneiramento em agitador mecânico, utilizando-se peneiras com aberturas de malha de 1,18, 0,6, 0,425, 0,25, 0,15 mm.

A determinação dos teores de silte e argila foi realizada por sedimentação. Para isto, as partículas menores que 0,075 mm foram transferidas para provetas de 1000 mL, onde foram agitadas manualmente e realizadas leituras com densímetro nos tempos: 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120 e 240 minutos e 8, 24, 36, 72 e 96 horas.

Após a determinação da curva granulométrica, foram calculadas as porcentagens de cascalho ( $>2,0$  mm), areia grossa (2,0-0,6 mm) areia média (0,6-0,2 mm) areia fina (0,2-0,06 mm), silte (0,06-0,002 mm) e argila ( $<0,002$  mm) (ABNT, 1995).

### ***Limites de Atterberg***

Para a determinação dos limites de Atterberg, as amostras deformadas foram passadas em peneiras com abertura de malha de 0,42 mm, descartando-se a fração mais grosseira.

O limite de contração (LC) foi determinado pela massa de água necessária para preencher os poros da pasta do solo seca em estufa a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. Para isto, foram preparadas pastas saturadas dos solos ( $<0,42$  mm), transferidas para cápsula de contração e secas ao ar até mudar a coloração. Após este procedimento, as amostras foram secas em estufa, pesadas e tiveram seus volumes determinados por meio do deslocamento do volume de água pela imersão das amostras impermeabilizadas com parafina a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Donagemma et al., 2011). A determinação da massa de água referente à porosidade da pasta saturada seca foi calculada de acordo com ABNT (1982).

Como limite de plasticidade (LP), foi considerada a umidade gravimétrica necessária para a moldagem de filetes de solo ( $<0,42$  mm), com aproximadamente 10 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro. Para isso, os filetes foram moldados manualmente sobre superfície de vidro e considerada como LP a umidade que permitiu o início da formação de fissuras quando os cilindros atingissem o diâmetro de 3,0 mm (ABNT, 1984c).

Para a determinação do limite de liquidez (LL) foram feitas pastas de solo saturado ( $<0,42$  mm), as quais foram transferidas para a concha do aparelho de determinação do LL, com espessura máxima de aproximadamente 1,0 cm. Após este procedimento, fez-se um sulco com auxílio de cinzel e aplicaram-se golpes consecutivos, em queda livre com altura de 1,0 cm, com frequência de dois golpes por segundo, até o fechamento de 1,0 cm do sulco. O ensaio foi repetido até se conseguir cinco pontos, cobrindo o intervalo de 15 a 35 golpes. Em seguida foi realizado o ajuste linear dos pontos e estimado o LL como a umidade referente a 25 golpes (ABNT, 1984a).

Com os resultados dos LL e LP, foram calculados o índice de plasticidade ( $IP = LL - LP$ ) (ABNT, 1984c) e a atividade da argila ( $A_c = LP/\%$  de argila) (Nelson et al., 2015).

### ***Coefficiente de expansão linear***

O coeficiente de expansão linear (COLE) foi determinado pela diferença de volume entre o solo saturado e seco em estufa a 105 °C. Para isto foram coletadas amostras não deformadas em anéis volumétricos de 5,0 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura, as quais foram saturadas em recipiente com lâmina de água de 2,3 cm. Após a saturação, foram retirados os excessos das amostras, deixando-as com o mesmo volume do anel e, em seguida, secas em estufa por 48 horas. Após sair da estufa, o volume da amostra foi determinado pelo deslocamento do volume de água pela imersão do solo impermeabilizado com parafina a 70 °C (Donagemma et al., 2011). A partir dos resultados obtidos foram calculadas a massa específica aparente solo saturado ( $\delta'$ ) e seco em estufa a 105 °C ( $\delta$ ), assim como índices de vazios dos solos saturados ( $\epsilon'$ ) e secos ( $\epsilon$ ), em que  $\epsilon = [1 - (\delta/\delta_a)] * 100$ .

O COLE foi determinado pela relação entre a  $\delta'$  e a  $\delta$ , conforme a Equação 1 (Nelson et al., 2015):

$$COLE = \left( \frac{\delta}{\delta'} \right)^{1/3} - 1 \quad (1)$$

### ***Ensaio de compactação de Proctor***

O ensaio de compactação foi realizado para os P01, P02, P04, P05 e P06. Para a realização deste ensaio, utilizou-se o cilindro de Proctor, com 1000 cm<sup>3</sup>, e um soquete de 2,5 kg e espaçamento de queda livre de 30,5 cm (ABNT, 1986). As amostras de solo utilizadas neste ensaio foram destorroadas e passadas em peneira com abertura de malha de 4,8 mm, das quais foram retiradas subamostras, sendo estas umedecidas, homogeneizadas e deixadas em equilíbrio por 24 horas. Cada subamostra foi umedecida com incremento e 2 % de umidade a base de massa, sendo o número de subamostras igual ao necessário para se alcançar três pontos antes da compactação máxima (ramo seco) e dois pontos após a compactação máxima (ramo úmido).

Cada subamostra foi submetida à compactação parcelada em três camadas, aplicando-se 26 golpes em cada. Ao final da compactação foram determinadas as massas específicas aparentes dos solos e suas respectivas umidades, obtendo-se então, a curva de compactação relacionando-se a massa específica aparente do solo compactado (eixo “y”) e a umidade de compactação (eixo “x”). Após o ensaio foi realizado o ajuste quadrático dos pontos de cada amostra e estimados os pontos máximos por meio da derivada de segunda ordem da curva. Os valores estimados das ordenada x e y foram considerados como a umidade ótima de compactação máxima ( $w_c$ ) e a massa específica aparente máxima ( $\gamma_c$ ), respectivamente.

Com os resultados obtidos, foi calculado o índice de vazios do solo referentes ao estado de compactação máxima ( $\epsilon_c$ ), em que  $\epsilon_c (\%) = [1 - (\gamma_c / \delta_a)] * 100$ . Foram também calculadas as massas específicas aparentes relativas entre a  $\gamma_c$  e as  $\delta'$  ( $\gamma_r'$ ) e  $\delta$  ( $\gamma_r$ ), sendo  $\gamma_r (\%) = (\gamma_c / \delta) * 100$ .

Foi ainda estimado o índice de saturação ( $I_s$ ) do solo no estado de compactação máxima pela relação entre a  $w_c$  e a umidade do solo saturado ( $w_s$ ), onde  $I_s (\%) = (w_c / w_s) * 100$ .

### ***Cisalhamento direto do solo saturado***

Para o presente estudo, foram realizadas análises de cisalhamento direto apenas em estado de saturação (ASTM, 2000), pois a realização desta análise com os corpos de prova em umidade de campo foi impedida pela forte coesão apresentada.

Para a realização do ensaio foram utilizados corpos de prova indeformados coletados em molde metálico de base quadrada com dimensões de 5x5x2 cm. Estes corpos de prova foram coletados em blocos de solo pré-umedecidos por capilaridade e moldados de acordo com o formato do molde metálico.

Antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram saturados por 24 horas, e em seguida adensados com a aplicação de tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, por quatro horas. Durante o tempo de adensamento, a variação da altura do copo de prova foi computada com auxílio de extensômetro digital, possibilitando a determinação da massa específica aparente do corpo de prova ( $\delta_{cp}$ ) e seu índice de vazios ( $\epsilon_{cp}$ ) após a

compactação. Com os resultados de  $\delta_{cp}$ , foram calculados os graus de compactação (GC) para cada tensão normal, sendo  $GC (\%) = [(\delta' - \delta_{cp})/\delta'] * 100$ .

Os cisalhamentos dos corpos de prova saturados foram realizados a uma velocidade de 0,1 mm/min, sendo a tensão de cisalhamento computada com auxílio de célula de carga. Após os ensaios com as três tensões normais, foi realizado o ajuste linear dos pontos de tensão máxima de cisalhamento ( $T_c$ ), obtendo-se assim, a coesão do solo saturado ( $c$ ), referente à tensão de cisalhamento sem a aplicação de tensão normal, estimada pela reta ajustada, e o ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), determinado a partir da inclinação da reta.

### **Análise estatística**

Todas as análises realizadas na caracterização geotécnica, exceto as estimadas por ajustes lineares, foram realizadas em triplicata. Os valores obtidos foram submetidos a análise estatística descritiva, utilizando-se o software Sisvar®, no qual foram determinadas medidas de tendência central (média) e de dispersão (variância, coeficiente de variação e valores máximos e mínimos).

## **RESULTADOS**

### **Granulometria, limites de Atterberg e COLE**

De modo geral, os solos analisados apresentaram granulometria predominantemente fina, em especial os solos da região do Recôncavo (P04, P05 e P06), que têm o folhelho como material de origem. Os P05 e P06 apresentaram teores totais de areia inferiores a 4 %, enquanto os teores de argila chegam a 62 e 81 %, respectivamente (Figura 2E,F).

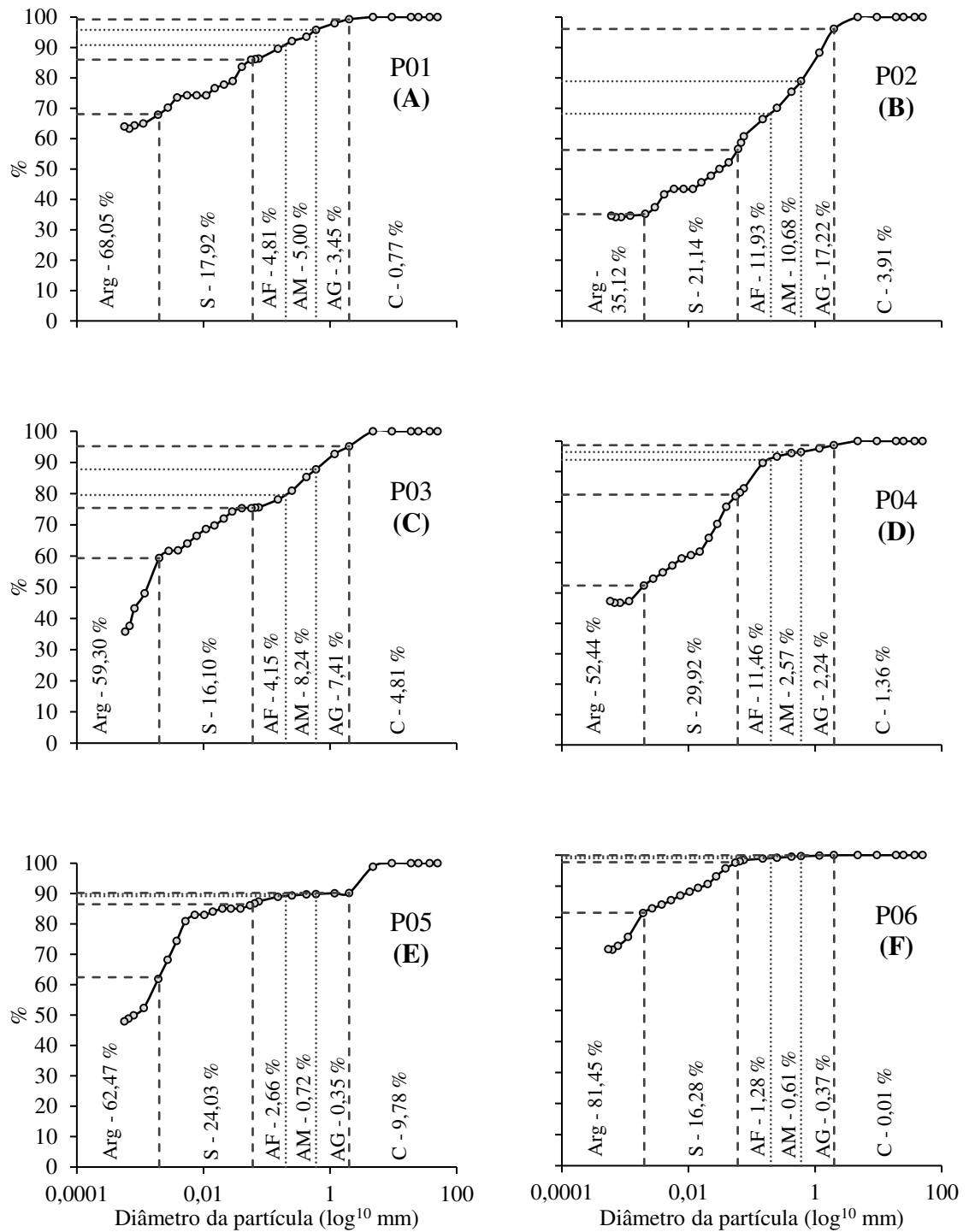


Figura 2. Curvas granulométricas dos Vertissolos do Estado da Bahia (Arg = argila; S = silte; AF = areia fina; AM = areia média; AG = areia grossa; C = cascalho)

É possível notar ainda que o P05 apresenta cerca de 10 % de cascalho fino, no entanto, este cascalho é composto por fragmentos de folhelho em estágio avançado de intemperismo. Sendo o folhelho uma rocha de granulometria fina, o intemperismo deste

material contribui para a formação de um solo com baixo teor de areia, o que pode ser visto pela descontinuidade da curva granulométrica no momento de transição do cascalho para a areia grossa (Figura 2E). Apesar de argiloso, o P04 tem uma distribuição granulométrica mais equilibrada que os P05 e P06, apresentando cerca de 11 % de areia fina e 30 % de silte (Figura 2D).

Para os perfis do Semiárido (P01, P02 e P03), foi observado uma maior variação quanto à distribuição granulométrica, com teores de argila variando entre 68 e 35 %, para P01 e P03, respectivamente (Figura 2A,B,C).

A distribuição granulométrica também refletiu nas umidades referentes aos limites de Atterberg dos solos estudados. Os solos do Recôncavo, mais argilosos e com menores teores de areia, apresentaram maiores valores, em comparação aos do Semiárido. Dentre os solos do Semiárido, os menores limites e índices de plasticidade são apresentados pelo P01 e pelo P02, enquanto a P03 apresenta valores mais próximos aos dos solos do Recôncavo (Tabela 5). Apesar destas diferenças, todos os solos apresentaram altos valores de LL e baixos de LP, resultando num alto índice de plasticidade (Nelson et al., 2015).

Tabela 5. Limites de Atterberg e atividade da argila dos Vertissolos do Estado da Bahia

Atributo	Média	$\sigma^2$	CV (%)	Mx	Mn
<b>P01 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico endosalino – Juazeiro-BA</b>					
LL (% massa)*	52,22	-	-	-	-
LP (% massa)	23,91	0,0805	1,19	24,29	23,61
IP (% massa)	28,31	0,0806	1,00	28,61	27,93
LC (% massa)	14,97	0,3225	3,79	15,40	14,32
Ac	0,4159	0,0000	1,00	0,4204	0,4105
<b>P02 – VERTISSOLOS HÁPLICO Sálico solódico – Juazeiro-BA</b>					
LL (% massa)*	52,39	-	-	-	-
LP (% massa)	21,94	0,2730	2,38	22,37	21,28
IP (% massa)	30,44	0,2730	1,72	31,11	30,02
LC (% massa)	12,27	0,9463	7,92	13,39	11,65
Ac	0,8669	0,0003	1,72	0,8859	0,8548
<b>P03 – VERTISSOLOS HÁPLICO Órtico típico hipocarbonático – Juazeiro-BA</b>					
LL (% massa)*	64,20	-	-	-	-
LP (% massa)	30,34	1,2961	3,75	31,78	28,83
IP (% massa)	33,86	1,2961	3,36	35,37	32,42
LC (% massa)	17,19	0,7492	5,03	18,06	16,33
Ac	0,5771	0,0004	3,36	0,5965	0,5467
<b>P04 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico com carbonato – São Francisco do Conde-BA</b>					
LL (% massa)*	66,67	-	-	-	-
LP (% massa)	30,06	0,1180	1,14	30,23	29,54
IP (% massa)	36,61	0,1180	0,94	37,12	36,44
LC (% massa)	15,55	0,1300	2,32	15,95	15,26
Ac	0,6981	0,0000	0,94	0,7079	0,6948
<b>P05 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico - São Sebastião do Passé-BA</b>					
LL (% massa)*	69,70	-	-	-	-
LP (% massa)	30,55	2,3545	5,02	32,04	29,11
IP (% massa)	39,15	2,3545	3,92	40,59	37,66
LC (% massa)	16,13	0,0912	1,87	16,44	15,84
Ac	0,6267	0,0007	3,92	0,6497	0,6029
<b>P06 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico – Santo Amaro-BA</b>					
LL (% massa)*	94,94	-	-	-	-
LP (% massa)	40,32	0,6878	2,06	41,46	39,51
IP (% massa)	54,61	0,6878	1,52	55,43	53,48
LC (% massa)	17,94	0,0674	1,45	18,19	17,67
Ac	0,6688	0,0001	1,52	0,6806	0,6566

$\sigma^2$  = variância; CV = coeficiente de variação; Mx = valor máximo; Mn = valor mínimo; LP = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade; LC = limite de contração; Ac = atividade da argila. \*atributo estimado por ajuste linear.

Nota-se também que, os solos do Recôncavo apresentam atividade de argila (Ac) (Tabela 5) próxima à esperada para solos com a fase mineral ilita (0,9) (Nelson et al., 2015), no entanto, a mineralogia destes solos é composta por uma mistura de fases

minerais, em que há a codominância de esmectita e caulinita (E-Ct). Assim, os valores de *Ac* apresentados são, portanto, intermediários entre os esperados para a montmorilonita (1,5 – 7,2) e caulinita (0,33 – 0,46) (Nelson et al., 2015).

A *Ac* do P01 (Tabela 5) correspondeu adequadamente ao esperado para solos com predominância de caulinita. Para P02 e P03, foram observados valores de *Ac* (Tabela 5) abaixo do esperado para solos com predominância de montmorilonita, o que mostra que, mesmo em pequenas proporções, as outras fases minerais menos expansivas contribuem para a diminuição da *Ac*.

Os diferentes tipos de argila do P01 e do P02 (Tabela 4), que apresentam maior e menor *Ac*, respectivamente (Tabela 5), explicam como estes dois solos, com granulometrias diferentes, apresentam valores próximos de LL, LP, IP e LC (Tabela 5).

A *Ac* também influenciou no potencial de expansão dos Vertissolos do Semiárido, em que os solos com maior (P03) e menor (P01) *Ac* apresentaram maior e menor COLE, respectivamente (Tabela 6). De modo geral, os Vertissolos do Recôncavo, mais argilosos que os do Semiárido, apresentaram maiores valores de  $\epsilon$  e  $\delta$  e menores valores de  $\delta'$  (Tabela 6). Esta grande diferença entre  $\delta$  e  $\delta'$ , resultou em maiores valores de COLE, quando comparado com a média dos valores dos Vertissolos do Semiárido (Tabela 6).

Tabela 6. Massa específica aparente, índice de vazios e COLE dos Vertissolos do Estado da Bahia

	Média	$\sigma^2$	CV (%)	Mx	Mn
<b>P01 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico endosalino – Juazeiro-BA</b>					
$\delta$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,79	0,0000	0,35	1,79	1,78
$\delta'$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,34	0,0003	1,28	1,32	1,35
$\varepsilon$ (% , volume)	33,32	0,0548	0,70	33,56	33,09
$\varepsilon'$ (% , volume)	53,64	4,8229	4,09	55,92	51,54
COLE	0,1002	0,0000	5,00	0,1057	0,0959
<b>P02 – VERTISSOLOS HÁPLICO Sáfico solódico – Juazeiro-BA</b>					
$\delta$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,96	0,0000	0,44	1,97	1,95
$\delta'$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,42	0,0014	2,58	1,39	1,46
$\varepsilon$ (% , volume)	26,95	0,1060	1,21	27,22	26,59
$\varepsilon'$ (% , volume)	49,11	2,8995	3,47	51,01	47,72
COLE	0,1119	0,0001	9,36	0,1191	0,0999
<b>P03 – VERTISSOLOS HÁPLICO Órtico típico hipocarbonático – Juazeiro-BA</b>					
$\delta$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,96	0,0049	3,57	2,03	1,89
$\delta'$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,26	0,0005	1,78	1,29	1,25
$\varepsilon$ (% , volume)	28,60	6,4981	8,91	30,93	25,88
$\varepsilon'$ (% , volume)	56,57	0,6569	1,43	57,35	55,73
COLE	0,1568	0,0000	4,58	0,1637	0,1493
<b>P04 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico com carbonato – São Francisco do Conde-BA</b>					
$\delta$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,78	0,0014	2,08	1,82	1,75
$\delta'$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,17	0,0002	1,32	1,16	1,19
$\varepsilon$ (% , volume)	34,60	1,8608	3,94	36,04	33,33
$\varepsilon'$ (% , volume)	61,62	0,2821	0,86	62,22	61,22
COLE	0,1500	0,0001	4,99	0,1560	0,1416
<b>P05 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico - São Sebastião do Passé-BA</b>					
$\delta$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,76	0,0008	1,60	1,78	1,73
$\delta'$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,20	0,0030	4,55	1,24	1,14
$\varepsilon$ (% , volume)	35,90	1,0568	2,86	37,07	35,17
$\varepsilon'$ (% , volume)	62,11	1,1073	1,69	63,00	60,95
COLE	0,1357	0,0004	14,89	0,1586	0,1203
<b>P06 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico – Santo Amaro-BA</b>					
$\delta$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,85	0,0014	2,01	1,88	1,81
$\delta'$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,04	0,0011	3,17	1,06	1,00
$\varepsilon$ (% , volume)	33,28	1,8068	4,04	34,77	33,17
$\varepsilon'$ (% , volume)	68,78	0,3321	0,84	69,30	68,16
COLE	0,2104	0,0003	8,24	0,2277	0,1930

$\sigma^2$  = variância; CV = coeficiente de variação;  $\delta$  = massa específica aparente do solo seco a 105 °C;  $\delta'$  = massa específica aparente do solo saturado;  $\varepsilon$  = índice de vazios do solo seco a 105 °C;  $\varepsilon'$  = índice de vazios do solo saturado; COLE = coeficiente de expansão linear.

### Ensaio de compactação de Proctor

Os solos da região Semiárida (Figura 3A,B) apresentaram maiores valores de  $\gamma_c$ , assim como os menores valores de  $w_c$ , quando comparados aos solos do Recôncavo (Figura 3C,D,E).

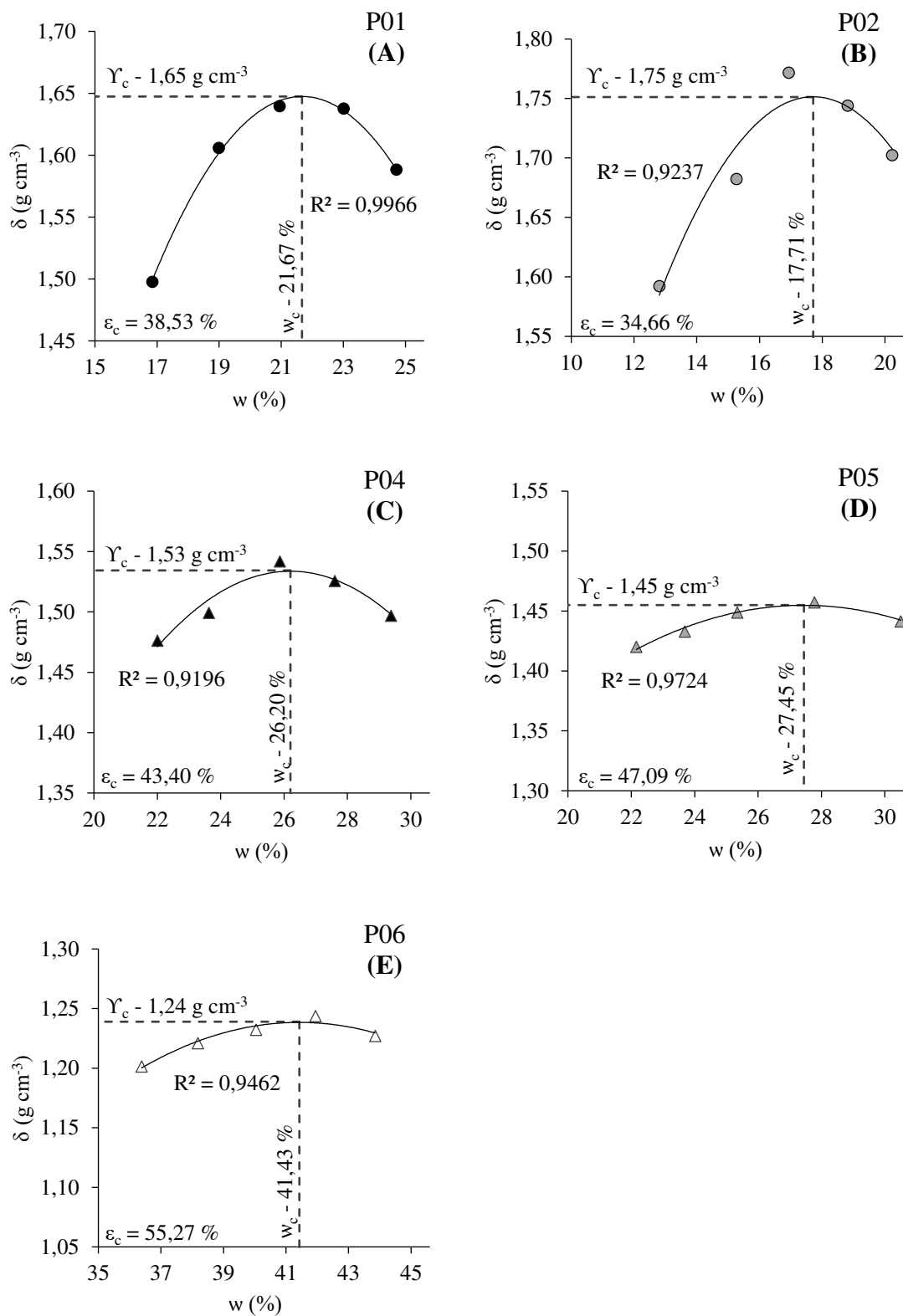


Figura 3. Curva de compactação dos Vertissolos do Estado da Bahia ( $\delta$  = massa específica aparente do solo seco;  $w$  = umidade gravimétrica;  $\gamma_c$  = massa específica aparente máxima;  $w_c$  = umidade ótima de compactação;  $\epsilon_c$  = índice de vazios do solo no estágio de compactação máxima)

Os solos do Recôncavo, por sua vez, apresentaram curvas de compactação mais abertas, indicando menor resposta do aumento da compactação em relação ao aumento da umidade (Figura 3C,D,E). Além disto, foi observado, para os solos desta região, uma maior  $\varepsilon_c$ , variando entre 43,40 a 55,27 %, em relação aos valores de 34,66 e 38,53 % apresentados pelos solos do Semiárido (Figura 3C,D,E).

Quando comparados os valores de  $\Upsilon_c$  com os de  $\delta$  e  $\delta'$ , nota-se que a  $\Upsilon_c$  está em uma posição intermediária, sendo menor que a  $\delta$  e maior que  $\delta'$ . Este comportamento pode ser observado pelos valores de  $\Upsilon_r$  e  $\Upsilon_r'$ , em que  $\Upsilon_r'$  é sempre maior que 100 % e  $\Upsilon_r$  sempre menor que 100 % (Tabela 7).

Tabela 7. Ensaio de compactação dos Vertissolos do Estado de Bahia

Atributo	Média	$\sigma^2$	CV (%)	Mx	Mn
<b>P01 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico endosalino – Juazeiro-BA</b>					
$\Upsilon_r$ (%)	92,18	0,10	0,35	92,51	91,87
$\Upsilon_r'$ (%)	122,76	2,50	1,29	124,58	121,75
Is (%)	54,29	8,14	5,25	56,88	51,23
<b>P02 – VERTISSOLOS HÁPLICO Sáfico solódico – Juazeiro-BA</b>					
$\Upsilon_r$ (%)	89,45	0,16	0,44	89,78	89,01
$\Upsilon_r'$ (%)	122,99	9,90	1,82	125,54	119,48
Is (%)	51,44	8,90	5,80	54,40	48,44
<b>P04 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico com carbonato – São Francisco do Conde-BA</b>					
$\Upsilon_r$ (%)	85,96	3,24	2,09	87,87	84,30
$\Upsilon_r'$ (%)	130,71	2,98	1,32	132,42	128,97
Is (%)	49,92	0,52	1,45	50,74	49,41
<b>P05 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico - São Sebastião do Passé-BA</b>					
$\Upsilon_r$ (%)	82,55	1,78	1,62	84,08	81,62
$\Upsilon_r'$ (%)	120,95	31,85	4,66	127,44	117,20
Is (%)	53,25	7,24	5,06	55,43	50,24
<b>P06 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico – Santo Amaro-BA</b>					
$\Upsilon_r$ (%)	67,05	1,85	2,03	68,57	65,94
$\Upsilon_r'$ (%)	118,90	14,74	3,23	123,32	116,44
Is (%)	62,81	4,42	3,34	64,39	60,42

$\sigma^2$  = variância; CV = coeficiente de variação;  $\Upsilon_r$  = relação entre as massas específicas do solo compactado e seco a 105 °C;  $\Upsilon_r'$  = relação entre as massas específicas aparentes do solo compactado e saturado; Is = índice de saturação do solo em estado de compactação máxima.

Para todos os solos, o estágio de compactação máxima foi alcançado com aproximadamente 50 % da umidade de saturação, como pode ser observado pelos valores dos índices de saturação ( $I_s$ ), que variaram entre 49,92 a 62,81 % (Tabela 7).

### Ensaio de cisalhamento direto do solo saturado

O adensamento com tensão normal de 200 kgf cm<sup>-2</sup> foi suficiente para alcançar valores de  $\delta_{cp}$  (Tabela 8) próximos aos de  $\Upsilon_c$  (Figura 3B,C,D,E), para os P02, P04, P05 e P06. O P01 apresentou maior resistência ao adensamento, principalmente entre as tensões de 100 e 200 kgf cm<sup>-2</sup>, mantendo a  $\delta_{cp}$  (Tabela 8) menor que a  $\Upsilon_c$  (Figura 3A).

Tabela 8. Ensaio de cisalhamento direto dos Vertissolos do Estado da Bahia

<b>N</b>	<b>Tc</b>	<b>GC</b>	<b><math>\delta_{cp}</math></b>	<b>Pt</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>c</b>
kPa	kgf cm <sup>-2</sup>	%	g cm <sup>-3</sup>	%	°	kgf cm <sup>-2</sup>
<b>P01 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico endosalino – Juazeiro-BA</b>						
50	0,29	3,06	1,51	43,54		
100	0,48	5,80	1,57	41,61	14,70	0,19
200	0,69	5,95	1,58	41,14		
<b>P02 – VERTISSOLOS HÁPLICO Sáfico solódico – Juazeiro-BA</b>						
50	0,22	3,11	1,60	40,11		
100	0,38	11,13	1,74	34,84	19,96	0,03
200	0,76	15,70	1,81	32,29		
<b>P03 – VERTISSOLOS HÁPLICO Órtico típico hipocarbonático – Juazeiro-BA</b>						
50	0,20	6,65	1,36	50,49		
100	0,38	15,20	1,54	43,70	19,97	0,02
200	0,74	24,05	1,67	38,92		
<b>P04 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico com carbonato – São Francisco do Conde-BA</b>						
50	0,28	3,11	1,30	52,50		
100	0,44	11,16	1,47	46,11	18,23	0,11
200	0,77	15,58	1,52	44,49		
<b>P05 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico - São Sebastião do Passé-BA</b>						
50	0,23	6,42	1,43	47,86		
100	0,31	11,72	1,50	45,42	13,02	0,09
200	0,59	16,51	1,59	42,31		
<b>P06 – VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico – Santo Amaro-BA</b>						
50	0,09	7,82	1,15	58,39		
100	0,23	13,32	1,23	55,53	7,36	0,05
200	0,30	18,47	1,32	52,36		

N = tensão normal; Tc = tensão de cisalhamento; GC = grau de compactação;  $\delta_{cp}$  = massa específica aparente do corpo de prova;  $\varepsilon_{cp}$  = índice de vazios do corpo de prova;  $\phi$  = ângulo de atrito interno do solo saturado; c = coesão do solo saturado.

Mesmo resistente ao adensamento, o P01 respondeu ao aumento das tensões normais com o aumento da resistência ao cisalhamento, apresentando o quarto maior  $\phi$ , depois dos P03, P02, e P04, nesta ordem (Tabela 8).

Embora todos os solos tenham respondido ao aumento da tensão normal, os ângulos de atrito mostraram-se baixos, entre 7,4° e 20,0°, o que é esperado para solos argilosos (Cho et al., 2006).

A coesão do solo saturado ( $c$ ) variou entre 2 e 19 kPa, usual para solos argilosos com baixa resistência ao cisalhamento (Adejumo et al., 2012). A maior  $c$  foi apresentada pelo Vertissolo caulínico (P01), seguido pelos solos com mineralogia E-Ct (P04, P05 e P06) e, por último, pelos esmectíticos (P02 e P03) (Tabela 8).

## DISCUSSÃO

### Influência da granulometria e do tipo de argila no potencial de expansão do solo

Todos os solos analisados apresentaram valores de COLE maiores que 0,1, tendo assim sua capacidade de expansão classificada como “muito alta” (Tabela 9). Mesmo inclusos dentro da mesma classificação, as diferenças dos valores do COLE dentre os perfis mostram que há uma variação dos potenciais de expansão que pode ser classificada, em ordem decrescente de expansividade, em P06>P03>P04>P05>P02>P01.

Tabela 9. Classificação do potencial de expansão pelos valores do COLE (Kariuki et al., 2004).

COLE	Potencial de expansão
0,00 – 0,01	Muito Baixo
0,01 – 0,03	Baixo
0,03 – 0,06	Médio
0,06 – 0,1	Alto
>0,1	Muito alto

COLE = coeficiente de expansão linear.

A capacidade de expansão pode ser explicada, principalmente, pelo teor e tipo de argila que está presente no solo, portanto, atributos como  $A_c$  e  $IP$  são comumente

utilizados para classificar o potencial de expansão do solo de forma indireta (Nayak, 1971; Kariuki et al., 2004; Hakari e Puranik, 2010, 2011; Türköz e Tosun, 2011; Zumrawi, 2013). A utilização destes critérios resultou em classificações diferentes para os Vertissolos estudados.

Ao se relacionar o teor de argila com a  $A_c$ , observou-se que apenas o P06 manteve-se na classe “muito alto”, enquanto o P02 ficou posicionado na área limítrofe entre as classes “alto” e “médio” e os demais na classe “alto” (Figura 4A). Neste caso, as diferenças de  $A_c$  foram compensadas pelos teores de argila do solo, como o P01, que, mesmo tendo menor  $A_c$ , teve sua capacidade de expansão classificada como “alta”, graças ao seu teor de argila superior a 68 % (Figura 4A).

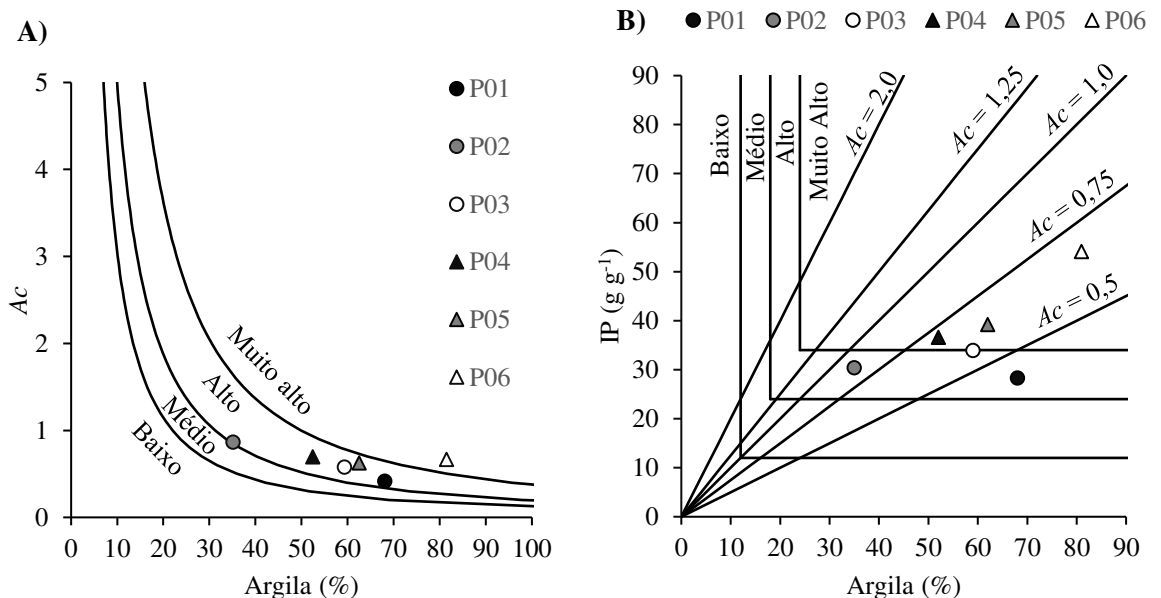


Figura 4. Classificação do potencial de expansão do solo pelas cartas propostas por **A)** Seed et al. (1962) e **B)** Carter e Bentley (1991) ( $A_c$  = atividade da argila).

Quando relacionado o teor de argila com o IP, a maior parte dos solos tem o potencial de expansão classificado como “muito alto”, sendo apenas o P01 e o P02 classificados como “Alto” (Figura 4B). É interessante observar que, mesmo as argilas menos ativas ( $A_c < 0,5$ ) poderiam ter um potencial de expansão considerado como alto, caso apresentasse teor de argila superior a 70 %. Do mesmo modo, solos com  $IP > 35$  %,

terão seus potenciais de expansão classificados como “muito alto”, desde que apresentem teores de argila superiores a 25 %.

Deste modo, pode-se entender que a formação das características vérticas, dependentes dos processos de expansão e contração do solo, não estão limitadas apenas à presença de argilas expansivas, mas também ao teor de argila presente no solo.

Os P01 e P02 exemplificam perfeitamente a relação entre o teor e o tipo de argila. Ambos desenvolveram características vérticas, como estrutura prismática, fendas e *slickensides*, e tiveram a mesma classificação dos potenciais de expansão (Figura 4A,B), no entanto apresentam características mineralógicas completamente diferentes (Tabela 4). Quando observado a *Ac* (Tabela 5) ou o potencial de expansão apenas da argila (Figura 5), estes dois perfis representam os extremos, sendo a argila caulínica do P01 a menos ativa e menos expansiva, enquanto a argila esmectítica do P02 apresenta maior *Ac* e maior expansividade.

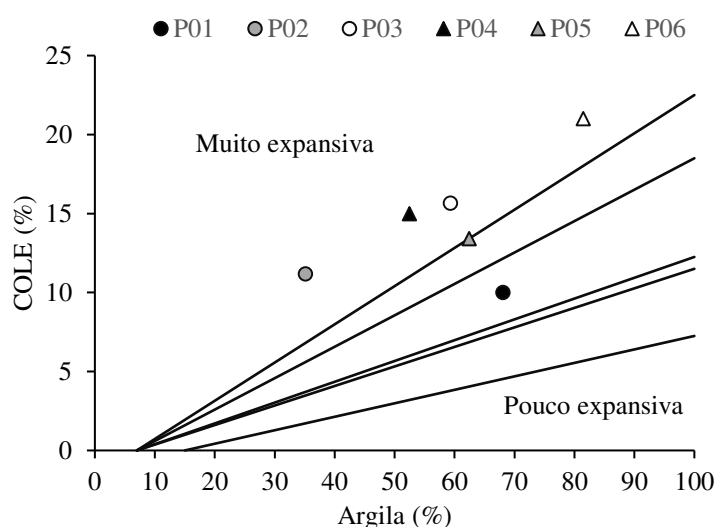


Figura 5. Classificação do potencial de expansão da argila (Lucian, 2016). COLE = coeficiente de expansão linear ( $COLE (\%) = COLE * 100$ ).

Assim, no caso do P01, o teor de argila superior a 68 % (Figura 2A) promoveu um potencial de expansão no solo, mesmo com argila predominantemente caulínica (Tabela 4), enquanto no P02, o potencial de expansão do solo com argila esmectítica (Tabela 4) foi limitado pelo teor de areia e cascalho superior a 40 % (Figura 2B).

O potencial de expansão das argilas também foi influenciado pelo tipo de cátion presente nas entrecamadas das esmectitas, em que os maiores teores de  $\text{Ca}^{2+}$  trocável promoveram menor capacidade de expansão das esmectitas. Por ser divalente e ter menor raio hidratado que o  $\text{Na}^+$ , o  $\text{Ca}^{2+}$  situado nas entre camadas das esmectitas promove menor absorção de água e, conseqüentemente, menor expansão e maior floculação (Heil e Sposito, 1993; Paiva et al., 2016; Zumrawi e Eltayeb, 2016).

Este comportamento foi observado na diferença do potencial de expansão da argila entre o P05 e o P06 (Figura 5). Estes dois perfis apresentam mineralogia E-Ct (Tabela 4), no entanto, o maior teor de  $\text{Ca}^{2+}$  apresentado pelo P05 (Tabela 3) reduziu o potencial de expansão da argila, deixando-a na região limítrofe entre as zonas de alta expansibilidade e expansibilidade intermediária (Figura 5).

### Ensaio de compactação de Proctor

Para o P02 e os solos do Recôncavo (P04, P05 e P06), a  $w_c$  e a  $\gamma_c$  dos solos estudados variaram de acordo com o teor de argila, em que a diminuição da porcentagem de argila promoveu o aumento da  $\gamma_c$  e a diminuição da  $w_c$  (Figura 6).

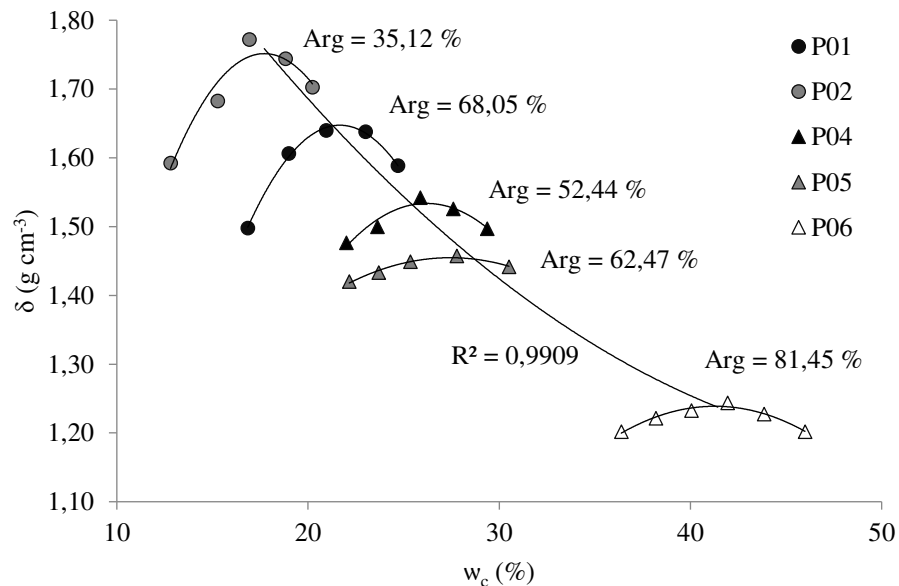


Figura 6. Ajuste quadrático dos pontos máximos das curvas de compactação de Proctor ( $\delta$  = massa específica aparente do solo seco;  $w_c$  = umidade gravimétrica; Arg = teor de argila).

Além disso, maiores teores de argila resultaram em curvas mais abertas (Figura 6), sendo um comportamento contrário ao esperado para solos argilosos, em que há maior deformação das estruturas com o aumento da umidade. No entanto, o comportamento dos solos submetidos à compactação não depende apenas do teor, mas também do tipo de argila presente (Wagner et al., 1994), demonstrando uma clara diferença dos Vertissolos em relação ao comportamento usual de outros solos argilosos.

Diferenças de comportamento, devido ao tipo de argila, foram observadas no P01, o qual apresentou a segunda maior  $\gamma_c$  e uma curva de compactação mais fechada, mesmo com o segundo maior teor de argila dentre todos os perfis (Figura 6). Contudo, a variação da  $\gamma_c$  em função da  $w_c$  dos Vertissolos estudados seguiu o comportamento semelhante aos apresentados por solos expansivos ao redor do mundo (Tabela 10) (Figura 7).

Tabela 10. Atributos geotécnicos de solos expansivos ao redor do mundo

Local	Areia	Silte	Argila	$\gamma_c$	$w_c$	$\phi$	$c$	Referência
	%			$\text{g dm}^{-3}$	%	°	$\text{Kgf cm}^{-2}$	
Austrália	11,0	22,0	67,0	1,5	21,0	-	-	*
	3,0	26,0	71,0	1,6	25,5	-	-	*
	14,0	18,0	68,0	1,6	27,0	-	-	*
	20,0	23,0	57,0	1,6	28,0	-	-	*
	1,0	29,0	70,0	1,5	29,0	-	-	*
Botswana	-	-	47-58	1,2	22,0	-	-	*
Brasil	-	-	-	1,4	25,0	13,0	0,12	(Simões de Oliveira et al., 2006)
Canadá	28,0	42,0	30,0	1,8	16,0	25,5	0,10	(Gan et al., 1988)
	-	-	-	1,6	23,9	23,4	0,17	(Chowdhury, 2013)
Chade	19,0	28,0	53,0	2,2	13,0	-	-	*
	14,0	34,0	52,0	1,7	18,6	-	-	*
China	-	-	-	-	-	24,6	0,78	(Ye et al., 2010)
	6,7	68,5	24,8	-	-	21,3	0,33	(Miao et al., 2002)
	-	-	-	-	-	15,6	0,37	(Heping et al., 2005)
	-	-	-	-	-	44,0	0,41	(Cokca et al., 2004)
	-	-	-	-	-	10,4	0,94	(Kong e Tan, 2000)
Etiópia	4,0	38,0	56,0	1,5	23,0	-	-	*
Gana	19,7	18,0	63,3	1,7	19,5	-	-	*
	38,3	15,2	46,5	1,8	17,5	-	-	*
Índia	6,0	54,0	40,0	1,3	35,0	-	-	*
	2,0	37,0	61,0	1,4	36,3	-	-	*
	7,0	41,0	52,0	1,3	28,0	-	-	*
	11,0	28,0	61,0	1,4	30,0	-	-	*
	6,0	54,0	40,0	1,3	35,0	-	-	*
	-	-	-	1,5	27,8	-	-	*
	28,0	32,0	40,0	1,7	20,0	-	-	*
	20,0	29,0	51,0	1,7	21,0	-	-	*
	-	-	-	1,4	21,0	-	-	*
	2,0	37,0	61,0	1,4	36,3	-	-	*
15,0	29,0	56,0	1,2	28,0	-	-	*	
-	-	-	-	-	21,0	0,04	(Shanker e Maruthi, 1989)	
Malásia	-	-	-	-	-	26,6	0,59	(Taha et al., 2000)
Nigéria	12,4	15,0	72,6	1,7	18,0	-	-	*
	20,0	5,0	75,0	1,6	19,2	-	-	*
	51,0	23,0	28,0	1,4	28,7	-	-	*
	-	-	-	1,4	24,3	-	-	*
	-	-	-	1,4	27,0	-	-	*
	-	-	-	-	-	4,0	1,22	(Adejumo et al., 2012)
-	-	-	-	-	12,0	2,24		
Polônia	4,8	40,2	45,0	-	-	6,5	0,58	(Kumor, 2008)
Romênia	25,8	21,9	52,3	-	-	9,5	0,51	(Gheorghe et al., 2013)
	25,8	20,7	53,5	-	-	10,0	0,66	
Singapura	-	-	16,6	-	-	31,5	0,82	(Rahardjo et al., 2004)
Tanzânia	19,0	31,0	48,0	1,7	18,7	-	-	*
	15,0	43,0	42,0	1,7	10,2	-	-	*
	6,0	34,0	60,0	1,4	28,5	-	-	*
	45,0	20,0	35,0	1,6	22,0	-	-	*
	8,0	27,0	65,0	1,6	17,0	-	-	*
25,0	37,0	38,0	1,3	36,0	-	-	*	
Zâmbia	14,0	35,0	51,0	1,8	16,0	-	-	*

\*Valores extraídos de Gidigas e Gawu (2013);  $\gamma_c$  = massa específica aparente máxima;  $w_c$  = umidade ótima de compactação  $\phi$  = ângulo de atrito interno do solo saturado;  $c$  = coesão do solo saturado.

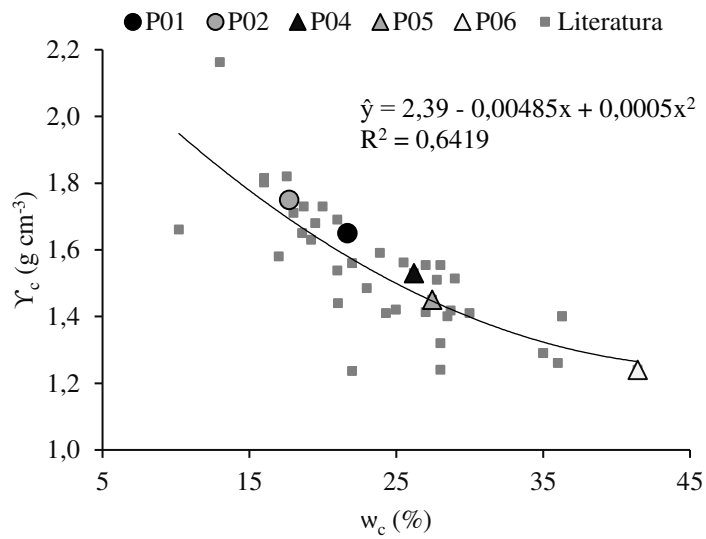


Figura 7. Relação entre as umidades ótimas de compactação ( $w_c$ ) e as massas específicas aparentes máximas ( $Y_c$ ) dos Vertissolos Estado da Bahia, em comparação com valores para solos expansivos citados na literatura (Tabela 10).

A mineralogia caulínica do P01 (tabela 4) facilitou a diminuição do índice de vazios (Figura 8B), e conseqüentemente, promoveu uma  $Y_c$  mais próxima da  $\delta$  (Figura 8A), se comparado aos outros solos.

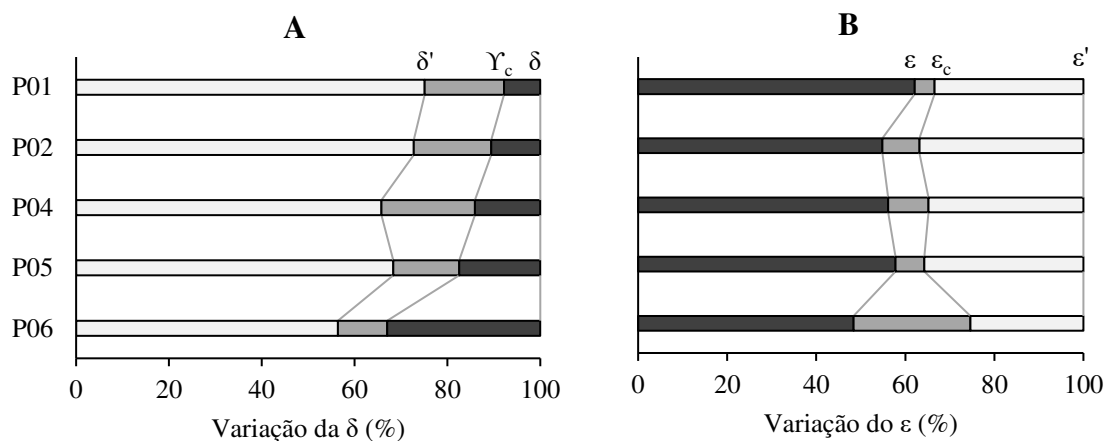


Figura 8. Variação das **A)** massas específicas aparentes dos solos secos em estufa a 105 °C ( $\delta$ ), saturados ( $\delta'$ ) e compactados ( $Y_c$ ) e dos **B)** índices de vazios dos solos secos em estufa a 105 °C ( $\epsilon$ ), saturados ( $\epsilon'$ ) e compactado ( $\epsilon_c$ ).

Portanto, a argila caulinítica do P01 contribuiu para a maior eficiência de compactação, dentre todos os solos analisados (Figura 8A,B). Por outro lado, a menor eficiência de compactação foi observada para o P06, em que a amostra compactada apresentou menor aumento da massa específica aparente (Figura 8A) e menor redução do índice de vazios (Figura 8B), se comparado ao estado de saturação.

Para os demais perfis, a eficiência de compactação foi intermediária, tendo as amostras compactadas apresentado reduções dos índices de vazios (Figura 8B) e aumento das massas específicas aparentes (Figura 8A) em proporções semelhantes. Percebe-se, porém, que o P02 e o P05 apresentaram eficiências de compactação semelhantes, mesmo apresentando atributos físicos e mineralógicos distintos. No caso do P02, houve uma compensação do baixo teor de argila (Figura 6) pela alta  $A_c$  (Tabela 5), limitando a compactação do solo (Figura 8). Por outro lado, para o P05, com o alto teor de argila (Figura 6), a compactação foi facilitada por um menor potencial de expansão da argila, se comparado ao P02 (Figura 5).

### **Cisalhamento direto**

Os valores de  $\phi$  e  $c$  observados para os Vertissolos do Estado da Bahia se encontram abaixo da média dos observados para solos expansivos ao redor do mundo (Figura 9A, B), estando, porém, dentro da faixa de valores apresentados por estes solos (Tabela 10). Este comportamento indica que, mesmo comparado a outros solos expansivos, os Vertissolos do Estado da Bahia apresentam baixa resistência ao cisalhamento.

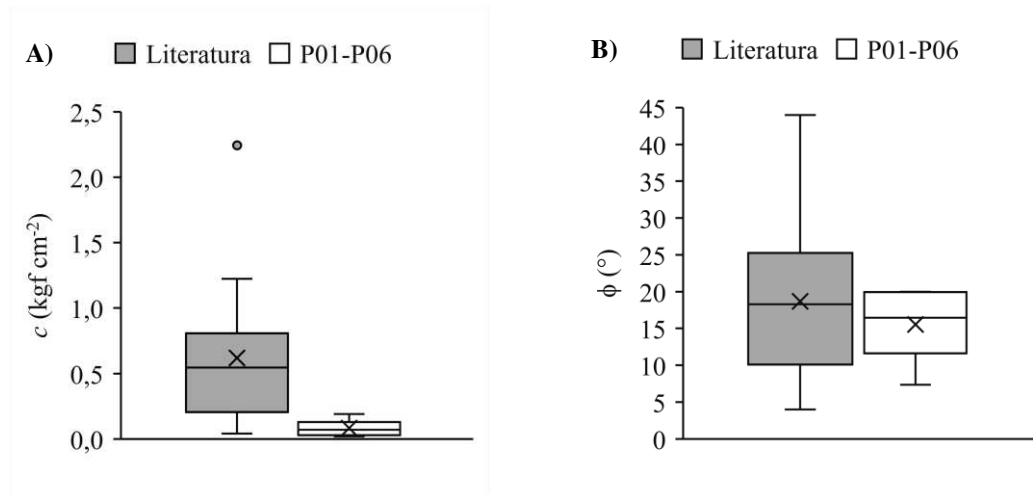


Figura 9. Valores de **A)** coesão ( $c$ ) e **B)** ângulo de atrito ( $\phi$ ) dos Vertissolos do Estado da Bahia em comparação com valores para solos expansivos citados na literatura (Tabela x).

Os resultados observados para os solos em estudo deixam claro que, assim como o potencial de expansão e a compactação do solos, a granulometria e o tipo de argila foram os principais fatores que influenciaram no ângulo de atrito e na coesão dos solos estudados.

Para  $c$ , foram observados maiores valores com o aumento da caulinita nas fases minerais predominantes da argila, o que permitiu a divisão dos solos em três grupos: P01 (caulinítico); P04, P05 e P06 (E-Ct) e P02 e P03 (esmectíticos) (Figura 10).

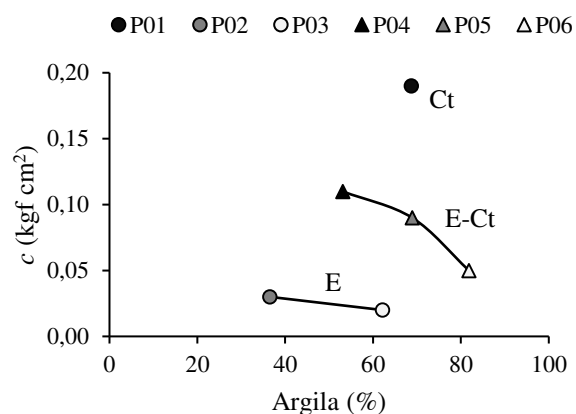


Figura 10. Variação da coesão do solo saturado ( $c$ ) em relação aos teores e tipos de argila (Ct = predominância de caulinita; E = predominância de esmectita; E-Ct = codominância de esmectita e caulinita).

Portanto, a maior  $c$  foi apresentada pelo P01, seguido pelos solos E-Ct do Recôncavo e, por último, os solos esmectíticos do Semiárido (Figura 10). Este comportamento se deve à capacidade das esmectitas de reter de água nas suas entre camadas, o que distancia as partículas de argila umas das outras diminuindo a interação entre elas e, conseqüentemente, a coesão do solo.

Para os solos E-Ct e esmectíticos, foi observada ainda a diminuição da  $c$  com o aumento do teor de argila, o que é esperado, visto que as esmectitas promovem menor coesão do solo saturado (Adejumo et al., 2012).

A granulometria também influenciou no ângulo de atrito interno dos solos estudados. De modo geral, o aumento do teor de partículas grosseiras, como areia e cascalho, dificulta o cisalhamento devido ao maior atrito gerado entre as partículas (Cho et al., 2006). Assim, para os solos estudados, o aumento do teor de areia e cascalho foi acompanhado pelo aumento do  $\phi$ , estabilizando entre 24,61 (P03) e 43,74 % (P02) (Figura 11).

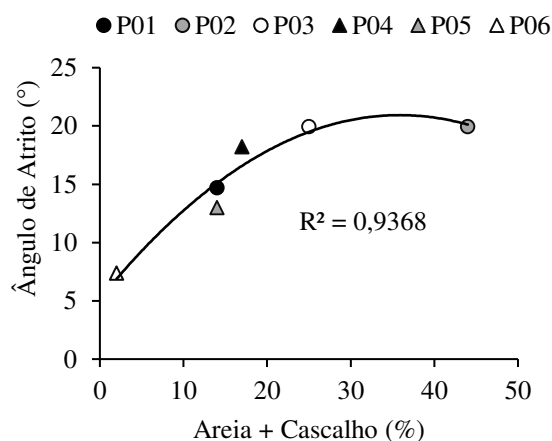


Figura 11. Relação entre o ângulo de atrito a as somas dos teores de areia e cascalho

Deste modo, o aumento dos teores de silte e argila resultaram na diminuição do  $\phi$ , independente da mineralogia da argila, indicando que, para este atributo, a distribuição dos tamanhos das partículas é mais influente do que o tipo de argila presente no solo.

## CONCLUSÕES

- O tipo e o teor de argila dos solos foram os atributos que mais influenciaram nas características geotécnicas avaliadas.
- O potencial de expansão aumentou com o aumento do teor de argila e maior presença de esmectita na fração argila.
- A presença de esmectitas e o alto teor de argila foram responsáveis pelo aumento do potencial de expansão quando há o predomínio de caulinita da fração argila.
- O aumento do teor de areia reduziu o potencial de expansão dos Vertissolos, mesmo quando há o predomínio de esmectitas na fração argila.
- A eficiência de compactação do solo foi maior com a predominância de caulinita na fração argila, diminuindo com o aumento do teor de argila rica em esmectita.
- O aumento do teor de argila com dominância ou codominância de esmectita provocou uma redução da massa específica aparente máxima e um aumento da umidade ótima de compactação, além de curvas de compactação mais abertas do que os solos com menores teores de argila ou com argila caulínica.
- A presença de caulinita aumentou a coesão do solo saturado, a qual diminuiu com o aumento do teor de argila, para os solos com mineralogias semelhantes.
- O ângulo de atrito interno dos solos saturados aumentou com o aumento dos teores de areia e cascalho e diminuiu com o aumento dos teores de silte e argila, independentemente da mineralogia, indicando que, para este atributo, a granulometria é mais importante do que o tipo de argila presente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7183. Determinação do limite e relação de contração de solos. Rio de Janeiro; 1982. p. 3.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459. Solos - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro; 1984a. p. 6.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6508. Grãos do solo que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica. 1984b. p. 8.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180. Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro; 1984c. p. 3.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181. Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro; 1984d. p. 13.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182. Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro; 1986. p. 10.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6502. Rochas e solos. Rio de Janeiro; 1995. p. 18.
- Adejumo TW, Alhassan M, Boiko IL. Physico-mechanical properties of some major weak soils in Nigeria. *Electron J Geotech Eng.* 2012;17:2435–2441.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. D 6828-00. Standard test method for consolidated undrained direct simple shear testing of cohesive soils. West Conchohocken: ASTM International; 2000. p. 9.
- Carter M, Bentley SP. *Correlations of soil properties.* London: Pentech Press; 1991.
- Chen FH. *Foundations on expansive soils.* Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company; 1988.
- Cho G-C, Dodds J, Santamarina JC. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands. *J Geotech Geoenvironmental Eng.* 2006;132:591–602.
- Chowdhury RH. *Shear strength properties of compacted expansive soils.* University of Regina; 2013.
- Cokca E, Erol O, Armangil F. Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay. *Geotech Geol Eng.* 2004;22:285–297.
- Donagemma GK, Campos DVB de, Calderano SB, Teixeira WG, Viana JHM. *Manual de métodos de análise de solo.* 2ª edição. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2011.
- Driscoll RMC, Crilly MS. *Subsidence damage to domestic buildings: lessons learned and questions remaining.* London: CRC Press; 2000.
- Ene E, Okagbue C. Some basic geotechnical properties of expansive soil modified using pyroclastic dust. *Eng Geol.* 2009;107:61–65.
- Gan JKM, Fredlund DG, Rahardjo H. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Can Geotech J.* 1988;25:500–510.
- Gheorghe R, Adia G, Dorin T, Radu B. Engineering properties of Vertisols. *Soil Form Factors Process from Temp Zo.* 2013;12:59–67.
- Gidigasu SS, Gawu SK. The mode of formation, nature and geotechnical characteristics of black cotton soils - a review. *Stand Sci Res Essays.* 2013;14:377–390.
- Hakari UD, Puranik SC. Evaluation of swell potential and identification of expansive and

- problematic soils in civil engineering works by newly developed matrices based on index and grain size properties. *Electron J Geotech Eng.* 2010;15:1712–1726.
- Hakari UD, Puranik SC. Evaluation of index and grain size properties of black cotton soils, Hubballi - Dharwad Municipal Corporation area, Karnataka, India. *Int J Earth Sci Eng.* 2011;4:543–554.
- Heil D, Sposito G. Organic matter role in illitic soil colloids flocculation: I. counter ions and pH. *Soil Sci Soc Am J.* 1993;57:1241.
- Heping Y, Yongxin Q, Jianlong Z. New development in studies on Ningming expansive soils. *Chinese J Geotech Eng.* 2005;27:981–987.
- Jacomine PKT, Cavalcanti AC, Silva FBR e, Montenegro JO, Formiga RA, de Mélo Filho HFR. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos da margem direita do rio São Francisco; Estado da Bahia (vol. 2). Recife: Embrapa, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos; 1979. p. 549.
- Kariuki PC, Woldai T, Van Der Meer F. Effectiveness of spectroscopy in identification of swelling indicator clay minerals. *Int J Remote Sens.* 2004;25:455–469.
- Kong LW, Tan LR. Study on shear strength and swelling-shrinkage characteristic of compacted expansive soil. *Unsaturated soils Asia Proc Asian Conf Unsaturated Soils, UNSAT-ASIA 2000.* Singapore; 2000. p. 515–519.
- Kumor MK. Selected geotechnical problems of expansive clays in the area of Poland. *Archit Civ Eng Environ.* 2008;1:75–92.
- Lima GK. Caracterização dos Vertissolos do Nordeste brasileiro. Universidade Federal Rural de Pernambuco; 2014.
- Lucian C. Prediction of expansive soil based on the coefficient of linear extensibility (COLE). *Int J Eng Res Sci.* 2016;2:71–76.
- Miao L, Liu S, Lai Y. Research of soil–water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil. *Eng Geol.* 2002;55:261–267.
- Nayak N V. Swelling characteristics of compacted, expansive soils. *Clays Clay Miner.* 1971;19:251–261.
- Nelson JD, Chao KC, Overton DD, Nelson EJ. *Foundation engineering for expansive soils.* New Jersey: John Wiley & Sons; 2015.
- Paiva SC de, Lima MA de A, Ferreira M da G de VX, Ferreira SR de M. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. *Matéria.* 2016;21:437–449.
- Quirk JP. Significance of surface areas calculated from water vapor sorption isotherms by use of the B.E.T. equation. *Soil Sci.* 1955;80:423–430.
- Rahardjo H, Aung K., Leong E., Rezaur R. Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. *Eng Geol.* 2004;73:157–169.
- Santos HG dos, Jacomine PKT, dos Anjos LHC, Oliveira VÁ, Lmbreras JF, Coelho MR, de Almeida JA, Cunha TJF, de Oliveira JB. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (3ª edição ampliada).* 3º ed. Brasília: Embrapa; 2013.
- Seed HB, Woodward Jr. RJ, Lundgren R. Prediction of swelling potential for compacted clays. *J Soil Mech Found Div.* 1962;88:53–88.
- Shanker NB, Maruthi G. Use of lime-soil piles for in-situ stabilization of black cotton soils. *Proc Indian Geotech Conf vol 1.* Meerut; 1989. p. 149–153.
- Simões de Oliveira AG, Jesus AC, Miranda SB. Estudo geológico geotécnico dos solos expansivos da região do Recôncavo Baiano. II Simpósio Bras Jovens Geotécnicos - II

Geojovem. Nova Friburgo; 2006.

- Taha MR, Hossain MK, Mofiz SA. Behaviour and modeling of granite residual soil in direct shear test. *J Inst Eng Malaysia*. 2000;61:27–40.
- Türköz M, Tosun H. The use of methylene blue test for predicting swell parameters of natural clay soils. *Sci Res Essays*. 2011;6:1780–1792.
- Wagner LE, Ambe NM, Ding D. Estimating a proctor density curve from intrinsic soil properties. *Am Soc Agric Eng*. 1994;37:1121–1125.
- Ye W, Zhang Y, Chen B, Zhou X, Xie Q. Shear strength of an unsaturated weakly expansive soil. *J Rock Mech Geotech Eng*. 2010;2:155–161.
- Yerima BPK, Calhoun FG, Senkayi AL, Dixon JB. Occurrence of interstratified kaolinite-smectite in El Salvador Vertisols. *Soil Sci Soc Am J*. 1985;49:462.
- Yerima BPK, Wilding LP, Calhoun FG, Hallmark CT. Volcanic ash-influenced Vertisols and associated Mollisols of El Salvador: physical, chemical, and morphological properties. *Soil Sci Soc Am J*. 1987;51:699.
- Yousif AA, Mohamed HHA, Ericsson T. Clay and iron minerals in soils of the clay plains of Central Sudan. *J Soil Sci*. 1988;39:539–548.
- Zumrawi M. Swelling potential of compacted expansive soils. *Int J Eng Res Technol*. 2013;2:1–6.
- Zumrawi MME, Eltayeb KA. Laboratory investigation of expansive soil stabilized with calcium chloride. *Int J Environ Chem Ecol Geol Geophys Eng*. 2016;10:223–227.

## CONCLUSÕES GERAIS

Na região Semiárida, Os Vertissolos estudados apresentaram diferentes estágios de intemperismo, sendo mais intemperizados à medida em que se aproximam do rio São Francisco. O perfil mais próximo ao rio São Francisco apresentou estágio de intemperismo mais avançado do que normalmente observado para Vertissolos, o que pode estar relacionado a uma possível influência da Formação Vazantes em seu material de origem, promovendo o aporte de materiais previamente intemperizados. Neste perfil, o baixo teor de esmectitas foi suficiente para promover os processos de expansão e contração do solo e, conseqüentemente, a formação de características vérticas.

Na região do Recôncavo, o material de origem pelítico e estratificado é o principal fator de formação que garantiu a conservação dos solos vérticos, pois limita a percolação de água no perfil, reduzindo a dessilicação e a lixiviação de bases. Mesmo com uma drenagem interna limitada, o clima muito úmido da região promoveu a formação de caulinita, principalmente em superfície. A gênese dos Vertissolos do recôncavo também é influenciada pelo relevo local, havendo um menor aprofundamento do perfil quando em relevo ondulado.

O potencial de expansão dos solos estudados está relacionado ao teor de argilominerais expansivos, assim como ao teor de argila total. Um alto teor de argila, mesmo com predominância de caulinita, foi capaz de promover uma capacidade de expansão próxima aos apresentados pelos solos esmectíticos. Dentre os solos esmectíticos, o potencial de expansão sofreu influência da granulometria, sendo os solos mais argilosos os que apresentaram maior expansão. A capacidade de compactação dos solos sofreu efeito inverso, em que os solos mais esmectíticos e mais argilosos apresentaram maior resistência à diminuição do índice de vazios.

A coesão do solo saturado foi influenciada, principalmente, pelo tipo de argila dominante e pela granulometria do solo. A presença de caulinita aumentou a coesão do solo saturado, a qual diminuiu com o aumento do teor de argila, para os solos com mineralogias semelhantes. O ângulo de atrito interno dos solos saturados aumentou com o aumento dos teores de areia e cascalho e diminuiu com o aumento dos teores de silte e argila, independentemente da mineralogia, indicando que, para este atributo, a granulometria é mais importante do que o tipo de argila presente

## **ANEXOS**

## DESCRIÇÃO GERAL

### PERFIL 01

**DATA** - 10/12/15

**CLASSIFICAÇÃO SiBCS:** VERTISSOLO HÁPLICO Órtico endosalino, textura muito argilosa, A moderado, fase caatinga hiperxerófila, relevo plano.

**MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:** Juazeiro-BA, 9° 23' 33"S 40° 24' 49"W (WGS)

**SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL:** Trincheira situada em área plana, sob bordadura de plantio de manga.

**ALTITUDE:** 384 m.

**LITOLOGIA:** Calcário da Formação Caatinga

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA:** Formação Caatinga.

**CRONOLOGIA:** Quaternário.

**MATERIAL ORIGINÁRIO:** Produto de alteração do calcário.

**PEDREGOSIDADE:** Não pedregosa.

**ROCHOSIDADE:** Não rochosa.

**RELEVO LOCAL:** Plano.

**RELEVO REGIONAL:** Plano.

**EROSÃO:** Não aparente.

**DRENAGEM:** Imperfeitamente drenado.

**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA:** Caatinga hiperxerófila arbóreo arbustiva pouco densa.

**USO ATUAL:** Plantio de manga irrigado.

**CLIMA:** ASwh', da classificação de Köppen.

**DESCRITO E COLETADO POR:** Gustavo M. N. Barbosa, Igor R. de Assis e Tony Jarbas F. Cunha.

## DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

**Ap** 0-6 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); argilosa; moderada, pequena, blocos angulares e moderada, média, granular; dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.

**Biv1** 6-30 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); muito argilosa; moderada, grande e muito grande, prismática composta de blocos angulares; muito dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa, transição difusa e plana.

**Biv2** 30-80 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); muito argilosa; moderada, grande e muito grande, prismática composta de blocos angulares; slickensides nítidos com grau de desenvolvimento moderado; muito dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa, transição difusa e plana.

**Biv3** 80-115 cm bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); muito argilosa; moderada, grande e muito grande, prismática composta de blocos angulares; slickensides nítidos com grau de desenvolvimento moderado; muito dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa, transição difusa e plana.

**Cv** 115-125+, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); muito argilosa; moderada, grande e muito grande, prismática composta de blocos angulares; muito dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa.

**RAÍZES** - Muito finas e médias no Ap, comuns, comuns, finas e médias no Biv1.

**OBSERVAÇÕES** – Presença de blocos de calcário no horizonte Cv



### Análises físicas e químicas

Perfil: P01

Solo: VERTISSOLO HÁPLICO Órtico endosalino

Horizonte		Fração da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina %				Argila dispersa em água %	Grau de flocculação %	Relação Silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade 105°C cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila >0,002 mm				Solo 105°C	Partículas	
Ap	0-6	0,00	0,28	99,72	13,41	13,12	14,26	59,21	21,23	64,13	0,241	-	2,58	-
Biv1	6-30	0,00	1,36	98,64	12,10	12,07	11,00	64,83	4,65	92,83	0,170	1,69	2,67	0,37
Biv2	30-80	0,00	1,14	98,86	12,15	12,03	10,35	65,46	20,47	68,73	0,158	1,79	2,71	0,34
Biv3	80-115	0,00	0,97	99,03	10,55	11,25	10,86	67,33	4,03	94,02	0,161	1,77	2,72	0,35
Cv	115-125+	0,00	0,79	99,21	9,51	10,32	10,28	69,90	7,51	89,26	0,147	1,77	2,62	0,32
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol/dm <sup>3</sup>								Valor V (sat. por bases) %	100.Al <sup>3+</sup> S+Al <sup>3+</sup> %	P assimilável mg/dm <sup>3</sup>	
	Água	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H+Al	Valor T				
Ap	7,4	6,0	24,73	3,80	0,50	0,25	29,28	0,00	1,00	30,28	96,70	0,00	11,30	
Biv1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biv2	8,0	6,4	27,17	3,32	0,08	0,46	31,03	0,00	0,80	31,83	97,50	0,00	1,70	
Biv3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cv	7,5	6,5	30,98	4,36	0,05	0,98	36,37	0,00	0,70	37,07	98,10	0,00	1,10	
Horizonte	C (orgânico) dag/kg	N dag/kg	C/N	Ataque sulfúrico dag/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre dag/kg	Equivalente de CaCO <sub>3</sub> dag/kg
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ki)	SiO <sub>2</sub> /R <sub>s</sub> O <sub>3</sub> (Kr)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Ap	1,04	-	-	21,85	13,53	4,47	0,209	0,042	-	2,75	2,27	-	-	3,62
Biv1	0,61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biv2	0,41	-	-	23,80	14,24	4,80	0,206	0,034	-	2,84	2,34	-	-	4,62
Biv3	0,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cv	0,41	-	-	24,66	14,42	4,65	0,209	0,033	-	2,90	2,41	-	-	2,68
Horizonte	100.Na <sup>2+</sup> T %	Pasta saturada		Sais solúveis cmol/kg							Constantes hídricas			
		C. E. do extrato dS/m 25°C	Água %	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Umidade		Água disponível máxima	
											-0,033 MPa	-1,5 MPa		
Ap	0,81	0,6278	36,81	3,92	0,92	2,41	13,98	0,19	5,00	0,92	-	-	-	
Biv1	-	0,6243	34,96	10,71	1,30	1,00	10,95	0,19	7,00	0,76	-	-	-	
Biv2	1,44	0,6792	35,33	4,28	0,67	0,34	17,07	0,06	6,50	0,27	-	-	-	
Biv3	-	1,296	35,81	7,61	1,19	0,52	34,26	0,06	13,50	0,65	-	-	-	
Cv	2,65	4,51	41,99	31,48	5,06	0,98	189,45	0,06	52,00	6,09	-	-	-	

## DESCRIÇÃO GERAL

### PERFIL 02

**DATA** - 10/12/15

**CLASSIFICAÇÃO SiBCS:** VERTISSOLO HÁPLICO Sáfico solódico, textura média, A moderado, fase caatinga hiperxerófila, relevo plano.

**MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:** Juazeiro-BA, 9° 30' 30"S 40° 22' 52"W (WGS)

**SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL:** Trincheira situada em área plana, levemente abaciada, sob vegetação de Caatinga hiperxerófila.

**ALTITUDE:** 387 m.

**LITOLOGIA:** Calcário da Formação Caatinga

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA:** Formação Caatinga.

**CRONOLOGIA:** Quaternário.

**MATERIAL ORIGINÁRIO:** Produto de alteração do calcário.

**PEDREGOSIDADE:** Não pedregosa.

**ROCHOSIDADE:** Não rochosa.

**RELEVO LOCAL:** Plano.

**RELEVO REGIONAL:** Plano.

**EROSÃO:** Não aparente.

**DRENAGEM:** Imperfeitamente drenado.

**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA:** Caatinga hiperxerófila arbóreo arbustiva pouco densa.

**USO ATUAL:** Vegetação nativa de Caatinga hiperxerófila.

**CLIMA:** ASwh', da classificação de Köppen.

**DESCRITO E COLETADO POR:** Gustavo M. N. Barbosa, Igor R. de Assis e Tony Jarbas F. Cunha.

## DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

**A** 0-6 cm, cinza-escuro (10YR 4/1, úmida); textura média; moderada, pequena, blocos angulares e moderada, media, granular; muito dura, firme a muito firme, plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.

**Biv1** 6-25 cm, cinza-escuro (10YR 4/1, úmida); textura média; fraca a moderada, grande, prismática composta por blocos angulares; slickensides comuns com desenvolvimento moderado; muito dura a extremamente dura, firme a muito firme, plástica e muito pegajosa; transição difusa e plana.

**Biv2** 52-80 cm, cinza-escuro (10YR 4/1, úmida); textura média; fraca a moderada, grande e muito grande, prismática composta por blocos angulares; slickensides comuns com desenvolvimento forte; muito dura e extremamente dura; firme a muito firme, plástica e muito pegajosa; transição difusa e ondulada.

**BCz** 80-105 cm, bruno-acinzentado (10YR 5/2, úmida); textura média; maciça; muito dura, firme, ligeiramente plástica e pegajosa; transição difusa e ondulada.

**Cz** 105-125 cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida); textura média; maciça; dura, firme, ligeiramente plástica e pegajosa; transição clara e ondulada.

**Crz** 125-175+ cm, bruno-claro (10YR 6/3, úmida); textura arenosa, cascalhenta; maciça; macia, firme, não plástica e não pegajosa.

**RAÍZES** – Finas a muito finas e finas no A e Biv1.

**OBSERVAÇÕES** – Presença de quartzito no Crz.



**Análises físicas e químicas**

Perfil: P02

Solo: VERTISSOLO HÁPLICO Sáfico solódico

Horizonte		Fração da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina %				Argila dispersa em água %	Grau de floculação %	Relação Silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade 105°C cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila >0,002 mm				Solo 105°C	Partículas	
A	0-6	0,00	6,24	93,76	23,08	14,03	27,34	35,55	4,76	86,61	0,769	-	2,56	-
Biv1	6-25	0,00	4,24	95,76	25,95	11,51	25,71	36,83	23,00	37,55	0,698	1,91	2,63	0,27
Biv2	25-80	0,00	5,08	94,92	27,37	11,91	23,72	36,99	12,81	65,37	0,641	1,90	2,70	0,30
BCz	80-105	0,00	3,49	96,51	33,80	12,44	19,14	34,62	11,02	68,17	0,553	1,87	2,69	0,31
Cz	105-125	0,00	6,05	93,95	38,29	16,50	15,01	30,20	6,16	79,59	0,497	1,84	2,69	0,32
Crz	125-175+	0,00	14,99	85,01	65,33	10,28	10,52	13,86	7,18	48,17	0,759	1,59	2,70	0,41
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol <sub>d</sub> /dm <sup>3</sup>								Valor V (sat. por bases) %	$\frac{100 \cdot Al^{3+}}{S+Al^{3+}}$ %	P assimilável mg/dm <sup>3</sup>	
	Água	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H+Al	Valor T				
A	7,7	6,54	27,23	4,99	1,75	0,13	34,11	0,00	0,80	34,91	97,70	0,00	12,50	
Biv1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biv2	7,87	6,51	28,62	4,58	0,24	4,37	37,81	0,00	0,70	38,51	98,20	0,00	9,10	
BCz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cz	8,1	7,13	25,74	4,55	0,25	8,33	38,86	0,00	0,50	39,36	98,70	0,00	182,50	
Crz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Horizonte	C (orgânico) dag/kg	N dag/kg	C/N	Ataque sulfúrico dag/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre dag/kg	Equivalente de CaCO <sub>3</sub> dag/kg
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ki)	SiO <sub>2</sub> /R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Kr)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
A	1,06	-	-	14,19	6,21	2,75	0,209	0,052	-	0,052	0,052	-	-	3,56
Biv1	0,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biv2	0,47	-	-	14,21	6,38	2,70	0,202	0,049	-	0,049	0,049	-	-	9,19
BCz	0,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cz	0,10	-	-	14,55	5,50	3,60	0,248	0,059	-	0,059	0,059	-	-	23,53
Crz	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horizonte	$\frac{100 \cdot Na^{2+}}{T}$ %	Pasta saturada		Sais solúveis cmol <sub>d</sub> /kg							Constantes hídricas			
		C. E. do extrato dS/m 25°C	Água %	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Umidade		Água disponível máxima	
											-0,033 MPa	-1,5 MPa		
A	0,37	1,12	37,08	11,28	2,82	9,69	5,92	0,88	15,00	0,91	-	-	-	
Biv1	-	0,63	38,30	4,28	0,92	1,90	13,40	0,19	5,50	0,42	-	-	-	
Biv2	11,35	2,29	40,35	10,35	1,88	2,00	107,15	0,19	25,50	0,42	-	-	-	
BCz	-	7,07	41,84	26,26	5,62	3,30	276,30	0,13	81,50	0,28	-	-	-	
Cz	21,15	7,15	40,44	27,94	5,93	3,56	272,76	0,13	84,25	0,17	-	-	-	
Crz	-	7,34	26,71	33,20	7,41	3,82	267,20	1,81	91,00	0,09	-	-	-	

## DESCRIÇÃO GERAL

### PERFIL 03

**DATA** – 10/12/15

**CLASSIFICAÇÃO SiBCS:** VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico hipocarbonático, textura argilosa, fase caatinga hiperxerófila, relevo plano.

**MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:** Juazeiro-BA, 9° 43' 47"S 40° 21' 44"W (WGS)

**SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL:** Tradagem realizada em área plana, sob pastagem degradada e algaroba.

**ALTITUDE:** 437 m.

**LITOLOGIA:** Calcário da Formação Caatinga

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA:** Formação Caatinga.

**CRONOLOGIA:** Quaternário.

**MATERIAL ORIGINÁRIO:** Produto de alteração do calcário.

**PEDREGOSIDADE:** Não pedregosa.

**ROCHOSIDADE:** Não rochosa.

**RELEVO LOCAL:** Plano.

**RELEVO REGIONAL:** Plano.

**EROSÃO:** Não aparente.

**DRENAGEM:** Imperfeitamente drenado.

**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA:** Caatinga hiperxerófila arbóreo arbustiva pouco densa.

**USO ATUAL:** Pastagem composta por gramíneas, herbáceas e algaroba.

**CLIMA:** ASwh', da classificação de Köppen.

**DESCRITO E COLETADO POR:** Gustavo M. N. Barbosa, Igor R. de Assis e Tony Jarbas F. Cunha.

## DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

**A** 0-5 cm, cinza-escuro (10YR 4/1, úmida); textura argilosa; moderada, pequena, blocos angulares e moderada, media, granular; muito dura a extremamente dura, firme a muito firme, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.

**Biv1** 5-24 cm, cinza-escuro (10YR 4/1, úmida); textura argilosa; fraca a moderada, grande, prismática composta por blocos angulares; slickensides comuns com desenvolvimento moderado; muito dura a extremamente dura, firme a muito firme, muito plástica e muito pegajosa; transição difusa e plana.

**Biv2** 24-50+ cm, cinza-escuro (10YR 4/1, úmida); textura argilosa; fraca a moderada, grande e muito grande, prismática composta por blocos angulares; slickensides comuns com desenvolvimento forte; muito dura a extremamente dura, firme a muito firme, muito plástica e muito pegajosa.

**RAÍZES** – Raras finas e muito finas no A; raras muito finas Biv1.



### Análises físicas e químicas

Perfil: P03

Solo: VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico hipocarbonático

Horizonte		Fração da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina %				Argila dispersa em água %	Grau de flocculação %	Relação Silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade 105°C cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila >0,002 mm				Solo 105°C	Partículas	
Ap	0-5	0,00	5,78	94,22	13,06	9,39	35,97	41,58	21,47	48,37	0,865	-	2,63	-
Biv1	5-24	0,00	2,56	97,44	16,28	7,16	32,84	43,71	6,73	84,60	0,751	1,72	2,64	0,35
Biv2	24-50+	0,00	2,64	97,36	14,83	7,14	32,31	45,71	20,85	54,40	0,707	1,76	2,64	0,33
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>								Valor V (sat. por bases) %	$\frac{100 \cdot Al^{3+}}{S+Al^{3+}}$ %	P assimilável mg/dm <sup>3</sup>	
	Água	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H+Al	Valor T				
Ap	8,05	6,78	57,08	4,80	0,18	0,07	62,13	0,00	0,20	62,33	99,70	0,00	0,40	
Biv1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biv2	8,30	6,82	55,44	4,90	0,04	0,22	60,61	0,00	0,70	61,31	98,90	0,00	0,30	
Horizonte	C (orgânico) dag/kg	N dag/kg	C/N	Ataque sulfúrico dag/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre dag/kg	Equivalente de CaCO <sub>3</sub> dag/kg
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ki)	SiO <sub>2</sub> /R <sub>s</sub> O <sub>3</sub> (Kr)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Ap	0,93	-	-	23,01	8,92	4,12	0,084	0,304	-	4,39	3,39	-	-	81,94
Biv1	0,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biv2	0,75	-	-	20,36	8,95	3,92	0,082	0,347	-	3,87	3,03	-	-	80,65
Horizonte	$\frac{100 \cdot Na^{2+}}{T}$ %	Pasta saturada		Sais solúveis cmol <sub>c</sub> /kg							Constantes hídricas			
		C. E. do extrato dS/m 25°C	Água %	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Umidade		Água disponível máxima	
											-0,033 Mpa	-1,5 Mpa		
Ap	0,11	0,42	40,65	5,16	0,47	1,13	2,42	0,31	1,50	0,87	-	-	-	
Biv1	-	0,23	42,35	4,78	0,26	0,37	3,25	0,38	1,00	0,78	-	-	-	
Biv2	0,37	0,25	43,40	5,62	0,22	0,47	38,67	0,13	1,00	0,56	-	-	-	

## DESCRIÇÃO GERAL

### PERFIL 04

**DATA** - 12/12/15

**CLASSIFICAÇÃO SiBCS:** VERTSSOLO HÁPLICO Órtico típico com carbonato, textura argilosa, A moderado, fase floresta tropical perenifólia, relevo plano.

**MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:** São Francisco do Conde-BA, 12° 37' 05"S 38° 40' 18"W (WGS)

**SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL:** Trincheira situada em área plana de várzea, em corte de drenagem, sob pastagem suja.

**ALTITUDE:** 11 m.

**LITOLOGIA:** Folhelhos cinza-esverdeados, intercalados com calcário.

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA:** Formação Candeias.

**CRONOLOGIA:** Cretáceo.

**MATERIAL ORIGINÁRIO:** Sedimentos coluviais.

**PEDREGOSIDADE:** Não pedregosa.

**ROCHOSIDADE:** Não rochosa.

**RELEVO LOCAL:** Plano.

**RELEVO REGIONAL:** Plano e suave ondulado a ondulado.

**EROSÃO:** Não aparente.

**DRENAGEM:** Imperfeitamente drenado.

**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA:** Floresta ombrófila densa.

**USO ATUAL:** Pastagem.

**CLIMA:** Af, da classificação de Köppen.

**DESCRITO E COLETADO POR:** Gustavo M. N. Barbosa, Igor R. de Assis e Luciano da S. Souza

## DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

**Ap** 0-20 cm, cinza-muito-escuro (10YR 3/1, úmida); textura argilosa; moderada, grande, prismática; extremamente dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.

**ABv** 20-42 cm, bruno (10YR 4/3, úmida); textura argilosa; fraca a moderada, grande, prismática; muito dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição difusa e plana.

**Biv** 42-73 cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida); textura argilosa; moderada, grande, prismática; slickensides poucos com grau de desenvolvimento moderado; muito dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.

**2C1** 73-98 cm, bruno (10YR 4/3, úmida); textura argilosa, cascalhenta; maciça; dura, firme, não plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

**3C2** 98-120+ cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida); textura argilosa; maciça; muito dura, firme, plástica e pegajosa.

**RAÍZES** – Poucas médias, comuns finas e muito finas no Ap; poucas médias e comuns muito finas no ABv e Biv; comuns muito finas no C1.

**OBSERVAÇÕES** – Perfil coletado próximo à transição entre a Formação Candeias e o Grupo Ilhas, situada nos terrenos de cotas mais altas que circundam a várzea, a norte e oeste;

Apenas no 2C1 não foram observadas fendas;

Grande atividade biológica do Ap, principalmente por formigas.



### Análises físicas e químicas

Perfil: P04

Solo: VERTSSOLO HÁPLICO Órtico típico com carbonato

Horizonte		Fração da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina %					Argila dispersa em água %	Grau de flocculação %	Relação Silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade 105°C cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila >0,002 mm	Solo 105°C				Partículas		
Ap	0-20	0,00	0,12	99,88	1,38	14,46	44,33	39,83	17,71	55,54	1,113	1,80	2,67	0,33	
ABv	20-42	0,00	2,41	97,59	3,20	17,28	36,25	43,27	16,79	61,19	0,838	1,77	2,67	0,34	
Biv	42-73	0,00	1,11	98,89	2,55	19,02	34,35	44,08	17,57	60,13	0,779	1,80	2,65	0,32	
C1	73-98	0,00	44,69	55,31	5,08	10,26	42,35	42,31	18,09	57,25	1,001	1,67	2,70	0,38	
C2	98-120+	0,00	0,06	99,94	0,54	12,95	41,11	45,41	9,00	80,19	0,905	1,74	2,67	0,35	
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol <sub>e</sub> /dm <sup>3</sup>								Valor V (sat. por bases) %	$\frac{100 \cdot Al^{3+}}{S+Al^{3+}}$ %	P assimilável mg/dm <sup>3</sup>		
	Água	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H+Al	Valor T					
Ap	7,29	6,13	34,42	9,40	0,56	0,18	44,56	0,00	1,70	46,26	96,30	0,00	70,70		
ABv	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Biv	8,21	6,97	31,73	6,77	0,09	0,12	38,71	0,00	1,20	39,91	97,00	0,00	64,70		
C1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
C2	8,09	6,90	31,46	8,30	0,22	0,55	40,53	0,00	1,20	41,73	97,10	0,00	75,80		
Horizonte	C (orgânico) dag/kg	N dag/kg	C/N	Ataque sulfúrico dag/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre dag/kg	Equivalente de CaCO <sub>3</sub> dag/kg	
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ki)	SiO <sub>2</sub> /R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Kr)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Ap	2,42	-	-	23,62	8,48	5,73	0,122	0,062	-	4,74	3,31	-	-	13,12	
ABv	0,81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biv	0,63	-	-	21,36	8,35	6,45	0,137	0,070	-	4,35	2,91	-	-	33,49	
C1	0,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
C2	0,65	-	-	22,08	8,76	6,21	0,169	0,071	-	4,28	2,95	-	-	16,41	
Horizonte	100.Na <sub>2</sub> T %	Pasta saturada		Sais solúveis cmol <sub>e</sub> /kg							Constantes hídricas				
		C. E. do extrato dS/m 25°C	Água %	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Umidade		Água disponível máxima		
											-0,033 Mpa	-1,5 Mpa			
Ap	0,38	0,94	56,66	8,97	3,13	3,94	5,70	0,69	7,50	0,47	-	-	-		
ABv	-	0,51	50,10	4,93	1,33	1,13	3,73	0,31	1,50	0,19	-	-	-		
Biv	0,30	0,37	49,13	2,96	0,98	0,85	3,51	0,31	1,50	0,39	-	-	-		
C1	-	0,62	31,95	3,86	1,33	1,26	9,20	0,25	5,50	1,53	-	-	-		
C2	1,31	0,65	55,09	3,77	1,54	1,26	14,01	0,25	5,00	1,65	-	-	-		

## DESCRIÇÃO GERAL

### PERFIL 05

**DATA** - 12/12/15

**CLASSIFICAÇÃO SiBCS:** VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico, textura argilosa, fase floresta tropical perenifólia, relevo ondulado.

**MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:** São Sebastião do Passé-BA, 12° 32' 23"S 38° 47' 48"W (WGS)

**SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL:** Trincheira situada em terço superior de encosta, com relevo ondulado e sob pastagem.

**ALTITUDE:** 55 m.

**LITOLOGIA:** Folhelhos cinza-esverdeados, intercalados com calcário.

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA:** Formação Candeias.

**CRONOLOGIA:** Cretáceo.

**MATERIAL ORIGINÁRIO:** Produto de alteração dos folhelhos.

**PEDREGOSIDADE:** Não pedregosa.

**ROCHOSIDADE:** Não rochosa.

**RELEVO LOCAL:** Onduado.

**RELEVO REGIONAL:** suave ondulado a forte ondulado.

**EROSÃO:** Laminar ligeira.

**DRENAGEM:** Imperfeitamente drenado.

**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA:** Floresta ombrófila densa.

**USO ATUAL:** Pastagem.

**CLIMA:** Af, da classificação de Köppen.

**DESCRITO E COLETADO POR:** Gustavo M. N. Barbosa, Igor R. de Assis e Luciano da S. Souza

## DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

**Ap** 0-18 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmida); textura argilosa; moderada a forte, grande, prismática composta por blocos angulares; muito dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição difusa e plana.

**Biv** 18-38 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmida); textura argilosa; moderada a forte, grande a muito grande, prismática composta por blocos angulares; slickensides poucos com grau de desenvolvimento moderado; muito dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição difusa e plana.

**BCv** 38-58 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmida); textura argilosa, cascalhenta; fraca a moderada, grande a muito grande, prismática composta por blocos angulares; muito dura, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

**Cv** 58-72 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmida); textura argilosa, cascalhenta; maciça; ligeiramente dura, firme, não plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa e plana.

**Cr** 72-85+ cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmida); textura argilosa, cascalhenta; maciça; ligeiramente dura, firme, não plástica e ligeiramente pegajosa.

**RAÍZES** – Comuns finas e muito finas no Ap; poucas médias e raras finas no Biv; raras finas no BCv.

**OBSERVAÇÕES** – Cascalho poroso e tenro composto por fragmentos de folhelho intemperizado no BCv, Cv e Cr;

Fragmentos de folhelho com estrutura conservada foram observado no Cr;

Grande atividade biológica do Ap, principalmente por formigas.



### Análises físicas e químicas

Perfil: P05

Solo: VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico

Horizonte		Fração da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina %					Argila dispersa em água %	Grau de flocculação %	Relação Silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade 105°C cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila >0,002 mm	Solo 105°C				Partículas		
Ap	0-18	0,00	0,46	99,54	9,92	22,14	28,58	39,36	8,54	78,30	0,726	1,74	2,56	0,32	
Biv	18-38	0,00	0,18	99,82	9,13	18,90	29,55	42,42	19,84	53,23	0,697	1,76	2,63	0,33	
BCv	38-58	0,00	24,02	75,98	0,86	1,61	45,07	52,46	26,21	50,04	0,859	1,73	2,72	0,36	
Cv	58-72	0,00	27,76	72,24	0,32	0,54	42,35	56,78	31,54	44,45	0,746	1,73	2,69	0,36	
Cr	72-85+	0,00	26,20	73,80	0,40	0,30	46,38	52,92	11,92	77,48	0,876	1,74	2,69	0,35	
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>								Valor V (sat. por bases) %	100.A1 <sup>3+</sup> S+Al <sup>3+</sup> %	P assimilável mg/dm <sup>3</sup>		
	Água	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H+Al	Valor T					
Ap	6,78	5,50	18,43	9,17	0,81	0,07	28,49	0,00	2,60	31,09	91,60	0,00	91,50		
Biv	6,44	5,02	19,53	9,59	0,40	0,09	29,61	0,00	4,10	33,71	87,80	0,00	27,50		
BCv	7,26	5,70	26,39	12,74	0,29	0,15	39,57	0,00	2,30	41,87	94,50	0,00	398,50		
Cv	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Cr	7,97	6,23	27,35	13,74	0,20	0,14	41,42	0,00	0,70	42,12	98,30	0,00	434,70		
Horizonte	C (orgânico) dag/kg	N dag/kg	C/N	Ataque sulfúrico dag/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre dag/kg	Equivalente de CaCO <sub>3</sub> dag/kg	
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ki)	SiO <sub>2</sub> /R <sub>s</sub> O <sub>3</sub> (Kr)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Ap	1,95	-	-	17,28	7,70	4,61	0,127	0,087	-	3,82	2,76	-	-	1,69	
Biv	1,30	-	-	19,06	8,66	4,84	0,145	0,086	-	3,74	2,76	-	-	1,00	
BCv	0,88	-	-	28,54	11,44	6,68	0,237	0,082	-	4,24	3,09	-	-	4,87	
Cv	0,67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cr	0,65	-	-	30,31	12,74	8,10	0,284	0,049	-	4,04	2,88	-	-	8,92	
Horizonte	100.Na <sup>2+</sup> T %	Pasta saturada		Sais solúveis cmol <sub>c</sub> /kg							Constantes hídricas				
		C. E. do extrato dS/m 25°C	Água %	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Umidade		Água disponível máxima		
											-0,033 Mpa	-1,5 Mpa			
Ap	0,23	0,45	52,33	3,29	2,13	6,50	4,83	0,31	2,00	0,72	-	-	-		
Biv	0,25	0,35	50,60	1,97	1,47	2,03	12,04	0,25	1,50	0,44	-	-	-		
BCv	0,37	0,24	51,59	1,19	1,02	1,11	11,60	0,25	1,00	0,49	-	-	-		
Cv	-	0,24	46,89	1,38	0,98	0,65	10,95	0,25	1,00	0,31	-	-	-		
Cr	0,33	0,26	44,90	1,61	1,16	0,90	11,60	0,25	1,00	0,79	-	-	-		

## DESCRIÇÃO GERAL

### PERFIL 06

**DATA** - 12/12/15

**CLASSIFICAÇÃO SiBCS:** VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico, textura muito argilosa, fase floresta tropical perenifólia, relevo plano.

**MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:** Santo Amaro-BA, 12° 29' 03"S 38° 38' 49"W (WGS)

**SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL:** Perfil situado em corte de erosão em sulco, em relevo plano, sob plantio de cana-de-açúcar.

**ALTITUDE:** 86 m.

**LITOLOGIA:** Folhelhos cinza-esverdeados, intercalados com calcário.

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA:** Formação Candeias.

**CRONOLOGIA:** Cretáceo.

**MATERIAL ORIGINÁRIO:** Produto de alteração dos folhelhos.

**PEDREGOSIDADE:** Não pedregosa.

**ROCHOSIDADE:** Não rochosa.

**RELEVO LOCAL:** plano.

**RELEVO REGIONAL:** Plano a suave ondulado.

**EROSÃO:** Em sulcos muito forte.

**DRENAGEM:** Imperfeitamente drenado.

**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA:** Floresta ombrófila densa.

**USO ATUAL:** plantio de cana-de-açúcar.

**CLIMA:** Af, da classificação de Köppen.

**DESCRITO E COLETADO POR:** Gustavo M. N. Barbosa, Igor R. de Assis e Luciano da S. Souza

## DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

**Ap** 0-13 cm, bruno-acinzentado-muito-escuro (10YR 3/2, úmida); textura argilosa; moderada, pequena e média, blocos subangulares; dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.

**ABv** 13-25 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); textura muito argilosa; forte, muito grande, prismática; dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.

**Bivn** 25-48 cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida); textura muito argilosa; forte, muito grande, prismática; Slickensides comuns com grau desenvolvimento forte; muito dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.

**BCvn** 48-74 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); textura muito argilosa; moderada, muito grande, prismática; Slickensides comuns com grau desenvolvimento forte; muito dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.

**Cvn** 74-100+ cm, coloração variegada, composta de bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida) e cinza-esverdeado-claro (5G 7/1, úmida); textura muito argilosa; fraca, muito grande, colunar; muito dura, muito firme, muito plástica e pegajosa.

**RAÍZES** – Comuns médias e finas no Ap; poucas finas no ABv; raras finas no BCv; raras finas nos Bivn e BCvn.

**OBSERVAÇÕES** – Foi observado a presença do material superficial preenchendo fendas com média de 3 cm de espessura, inclusive no Cvn.

### Análises físicas e químicas

Perfil: P06

Solo: VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico

Horizonte		Fração da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina %				Argila dispersa em água %	Grau de flocculação %	Relação Silte/argila	Densidade g/cm <sup>3</sup>		Porosidade 105°C cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila >0,002 mm				Solo 105°C	Partículas	
Ap	0-13	0,00	0,57	99,43	3,50	4,90	32,74	58,85	32,52	44,74	0,556	1,66	2,52	0,34
ABv	13-25	0,00	0,06	99,94	2,19	2,41	22,48	72,92	15,06	79,35	0,308	1,77	2,66	0,33
Bivn	25-48	0,00	0,03	99,97	0,89	0,78	7,65	90,68	11,36	87,47	0,084	1,71	2,72	0,37
BCvn	48-74	0,00	0,02	99,98	0,56	0,89	13,06	85,50	33,76	60,51	0,153	1,73	2,67	0,35
Cvn	74-100+	0,00	0,02	99,98	0,66	1,00	11,85	86,49	15,61	81,96	0,137	1,70	2,76	0,38
Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol/dm <sup>3</sup>								Valor V (sat. por bases) %	100.Al <sup>3+</sup> S+Al <sup>3+</sup> %	P assimilável mg/dm <sup>3</sup>	
	Água	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S (soma)	Al <sup>3+</sup>	H+Al	Valor T				
Ap	5,22	3,79	21,25	10,59	0,47	0,12	32,43	1,70	9,20	41,63	77,90	5,00	7,70	
ABv	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bivn	5,23	3,58	19,69	12,67	0,20	0,31	32,87	10,70	16,30	49,17	66,80	24,60	1,10	
BCvn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cvn	4,74	3,61	23,60	20,62	0,32	4,72	49,25	3,70	6,60	55,85	88,20	7,00	1,10	
Horizonte	C (orgânico) dag/kg	N dag/kg	C/N	Ataque sulfúrico dag/kg						Relações moleculares			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> livre dag/kg	Equivalente de CaCO <sub>3</sub> dag/kg
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ki)	SiO <sub>2</sub> /R <sub>s</sub> O <sub>3</sub> (Kr)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Ap	2,12	-	-	24,06	10,74	7,79	0,145	0,147	-	3,81	2,60	-	-	1,19
ABv	1,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bivn	0,85	-	-	32,08	13,06	8,59	0,215	0,016	-	4,18	2,94	-	-	0,00
BCvn	0,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cvn	0,79	-	-	31,74	13,84	9,05	0,214	0,017	-	3,90	2,75	-	-	1,87
Horizonte	100.Na <sup>2+</sup> T %	Pasta saturada		Sais solúveis cmol/kg							Constantes hídricas			
		C. E. do extrato dS/m 25°C	Água %	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Umidade		Água disponível máxima	
											-0,033 Mpa	-1,5 Mpa		
Ap	0,28	0,30	49,55	1,40	0,92	1,87	4,30	0,00	2,25	0,30	-	-	-	
ABv	-	0,14	60,34	0,38	0,43	0,49	4,21	0,00	1,00	0,56	-	-	-	
Bivn	0,63	0,12	59,69	0,19	0,22	0,60	12,48	0,00	1,00	0,75	-	-	-	
BCvn	-	0,19	61,72	0,23	0,33	0,52	15,54	0,00	1,50	0,90	-	-	-	
Cvn	8,45	2,03	69,36	4,95	5,24	1,80	42,08	0,00	20,50	1,93	-	-	-	