

ANÁLISE ESPECTRAL DE SOLOS DO LITORAL PIAUIENSE**Coastal soils spectral analysis of piauiense****Análisis espectral de suelos costeros de piauiense**

Gustavo Souza Valladares
Universidade Federal do Piauí
valladares@ufpi.edu.br

Marcos Gervasio Pereira
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
mgervasiopereira01@gmail.com

Léya Jéssyka Rodrigues Silva Cabral
Universidade Federal do Piauí
leyarodriguescabral@gmail.com

João Victor Alves Amorim
Universidade Federal do Piauí
amorim1994@hotmail.com

Resumo

O litoral do Piauí tem uma extensão de apenas 66km, e sua planície litorânea têm sido submetido à elevada pressão com a ocupação, que vem ocorrendo de forma desordenada. O conhecimento do recurso natural solo é fundamental para o ordenamento territorial responsável. São raros os trabalhos sobre os solos do Piauí em escala mais detalhada. O presente trabalho traz maior detalhamento de solos piauienses e tem como objetivo analisar a resposta espectral de solos representativos das diferentes paisagens do litoral deste estado na faixa do visível e do infravermelho (350 a 2500nm) e faz inferência para fins de classificação. Foi possível com a interpretação das curvas espectrais fazer associação a vários atributos dos solos e relacionar com a sua gênese e classificação. Os resultados indicam que esse método pode ser eficiente em levantamentos de solos do litoral piauiense.

Palavras-chave: pedometria; curvas espectrais; solos hidromórficos; esmectita.

Abstract

The coast of Piauí is only 66km long, and its coastal plain has been under heavy pressure for occupation, which has been occurring in a disorderly manner. Knowledge of the natural soil resource is fundamental for responsible territorial planning. Works on Piauí soils on a more detailed scale are rare. The present work brings more detail of Piauí soils and aims to analyze the spectral response of soils representative of the different landscapes Piauí's coast in the visible and infrared range (350 to 2500nm) and makes inference for classification purposes. With the interpretation of spectral curves was possible to make association with various soils attributes and relate to their genesis and classification. The results indicate that this methodology can be efficient in soil surveys of the Piauí coast.

Keywords: pedometry; spectral curves; hydromorphic soils, smectite.

Resumen

La costa de Piauí tiene solo 66 km de largo, y su llanura costera ha estado bajo una fuerte presión por la ocupación, que ha estado ocurriendo de manera desordenada. El conocimiento del recurso natural suelo es fundamental para una planificación territorial responsable. Los trabajos en suelos de Piauí en una escala más detallada son raros. El presente trabajo aporta más detalles de los suelos de Piauí y tiene como objetivo analizar la respuesta espectral de los suelos representativos de los diferentes paisajes de la costa de Piauí en el rango visible e infrarrojo (350 a 2500 nm) y hace inferencia para fines de clasificación. Con la interpretación de las curvas espectrales fue posible asociarse con varios atributos de los suelos y relacionarse con su génesis y clasificación. Los resultados indican que esta metodología puede ser eficiente en estudios de suelos de la costa de Piauí.

Palabras clave: pedometría; curvas espectrales; suelos hidromórficos, esmectita.

Introdução

O conhecimento dos solos de uma determinada região é fundamental para o desenvolvimento sustentável e sua conservação. Os solos são fundamentais para a sustentação da vida em sistemas agrícolas ou em áreas protegidas. É suporte para a expansão das cidades e importante em atividades como o turismo. Ainda são escassas as pesquisas sobre solos no litoral do Piauí (JACOMINE et al., 1986; IBGE/DGC, 2014, CABRAL et al., 2019, AMORIM et al., 2019), sendo que somente recentemente foram gerados mapas em escalas maiores para uma parte do litoral piauiense (CABRAL et al., 2019, AMORIM et al., 2019).

O uso e manejo adequado do solo requer o conhecimento de seus atributos químicos, físicos, mineralógicos e biológicos (BELLINASSO et al., 2010). O uso de sensores que façam a caracterização espectral dos solos traz avanços nesse sentido, pois muitos trabalhos têm mostrado relações entre classes de solos e diversos atributos com o espectro eletromagnético (Pizarro et al., 2001; McBratney et al., 2006; Nanni & Demattê, 2006; Sousa Júnior et al., 2008; Bellinasso et al., 2010; Genú et al., 2010; Demattê et al., 2016; Viscarra Rossel et al., 2016; Terra et al., 2018; Romero et al., 2018; Dotto et al., 2018, Poppiel et al., 2019; Demattê et al., 2019; Mendes et al., 2022).

A caracterização espectral dos solos tem se mostrado promissora e vantajosa em relação a outros métodos de análise devido a vantagens como rapidez, custos operacionais e capacidade de analisar grande número de amostras (McBratney et al., 2006). Com o avanço do mapeamento digital dos solos, a assinatura espectral do solo é uma ferramenta promissora e aplicável a levantamentos pedológicos (McBratney et al., 2003; Dematte et al., 2004; Demattê et al., 2016; Teng et al., 2018; Srivastava, 2018). Resultados de pesquisas têm demonstrado correlação entre a resposta espectral dos solos e o estudo em toposequências (Pinheiro et al., 2017; Poppiel et al., 2019).

A faixa do espectro eletromagnético que tem sido mais estudada e tem dado resultados relevantes com as propriedades dos solos tem sido a faixa do visível (VIS: 350-780nm), infravermelho próximo (NIR: 780-1.100nm), e infravermelho médio (SWIR: 1.100-2.500nm), conforme Poppiel et al. (2019).

A partir do exposto, o objetivo do presente trabalho foi analisar a resposta espectral de solos representativos das diferentes paisagens do litoral piauiense na faixa do visível e do infravermelho (350 a 2500nm) e fazendo inferência para fins de classificação.

Material e Métodos

A área de estudo localiza-se no norte do Piauí (Figura 1), compreendendo solos da planície litorânea originários de sedimentos do Terciário e do Quaternário, com classe textural variando de arenosa a argilosa. Na região observa-se clima do tipo Aw segundo Köppen, com período chuvoso entre janeiro e maio. A precipitação varia entre 800 a 1600mm anuais, e as temperaturas mínimas e máximas entre 25 e 32°C. A vegetação na área de estudo apresenta uma grande diversidade de fisionomias, sendo verificado o predomínio de espécies da caatinga, com portes variados desde herbáceas até arbóreos. Em certos locais existe associação com carnaúbas e em outros predominam manguezais (CEPRO, 1996; Portela et al., 2020).

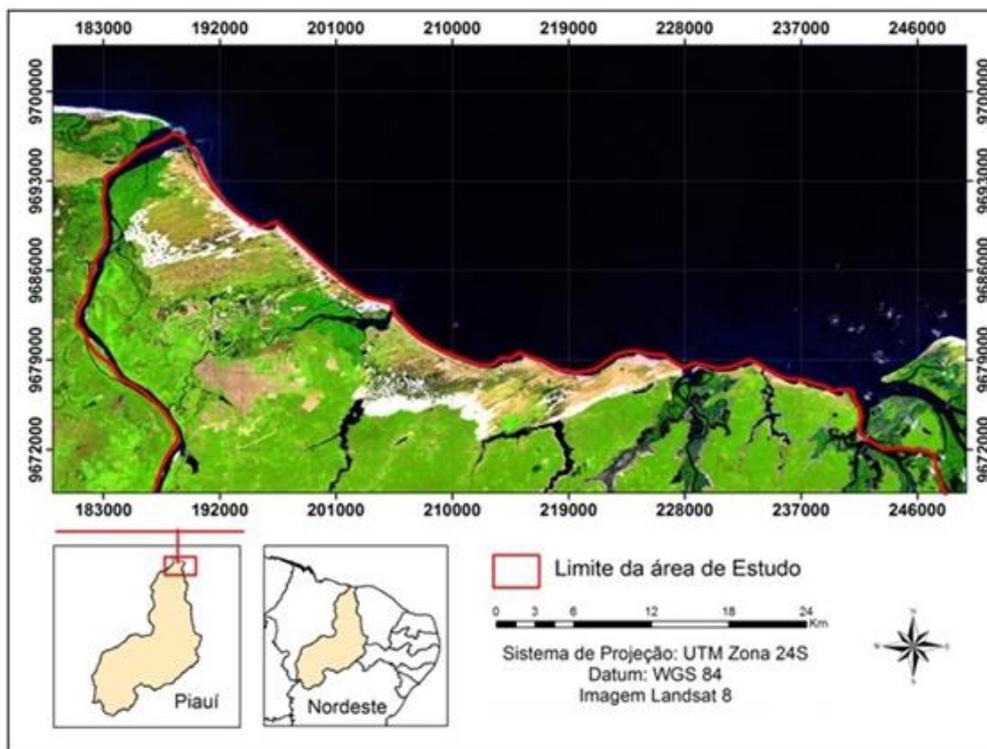


Figura 1. Planície costeira do estado do Piauí.
Fonte: Autores.

Foram descritos, coletados e caracterizados 21 perfis de solos representativos da área de estudo segundo Santos et al. (2015), Santos et al. (2018) e Teixeira et al. (2017). Os solos foram descritos quanto aos seus atributos morfológicos descritos e caracterizados através das seguintes análises: granulometria, pH em água, cálcio, magnésio, sódio, potássio, acidez potencial, valor T, saturação por bases, carbono orgânico, fósforo assimilável, saturação por sódio e condutividade elétrica, segundo Teixeira et al. (2017).

Os solos estudados fazem parte da biblioteca espectral de solos do Brasil (Demattê et al., 2019) e foram classificados como: NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico (perfis P1 e P21), NEOSSOLO FLÚVICO Sódico típico (P2), PLANOSSOLO NÁTRICO Sálico neofluvissólico (P3), NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico sódico (P4), GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico neofluvissólico (P5 e P6), GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico (P7 e P8), NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Hidromórfico sálico sódico (P9), ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Hidromórfico arênico sódico (P10), ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Hidromórfico arênico neofluvissólico (P11), VERTISSOLO HÁPLICO Sódico típico (P12), GLEISSOLO HÁPLICO Sódico neofluvissólico (P13 e P14), CAMBISSOLO FLÚVICO Sódico vertissólico salino (P15), GLEISSOLO SÁLICO Sódico típico (P16 e P17), ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico (P18), NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico (P19) e NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Hidromórfico típico (P20).

Todas as amostras foram previamente secas a 45 °C e peneiradas com malha de ≤ 2 mm e depois homogeneamente distribuídas em placas de Petri, antes da medida dos espectros. Os dados espectrais foram adquiridos no GeoCis, ESALQ/USP, utilizando o espectrorradiômetro Fieldspec 3 (Analytical Spectral Devices - ASD, Boulder, CO), com faixa espectral de visível para ondas curtas ao infravermelho próximo (350 - 2500 nm) e resolução espectral de 1 nm de 350 a 700 nm, 3 nm de 700 a 1400 nm e 10 nm de 1400 a 2500 nm. O intervalo de amostragem da saída de dados é de 1 nm, reportando 2151 canais.

O sensor espectral, que foi usado para capturar a luz através de um cabo de fibra óptica, foi alocado a 8 cm da superfície da amostra. O sensor digitalizou uma área de aproximadamente 2 cm² e uma fonte de luz foi fornecida por duas lâmpadas externas de halogênio de 50 W. Estas lâmpadas foram posicionadas a uma distância de 35 cm da amostra (raios não colimados e um ângulo zenital de 30°) com um ângulo de 90° entre elas. Uma placa branca padrão Spectralon foi digitalizada a cada 20 minutos durante a calibração. Duas réplicas (uma envolvendo uma volta de 180° da placa de Petri) foram obtidas para cada amostra. Cada espectro foi calculado a partir de 100 leituras ao longo de 10 s. Os valores médios de duas repetições foram usados para cada amostra.

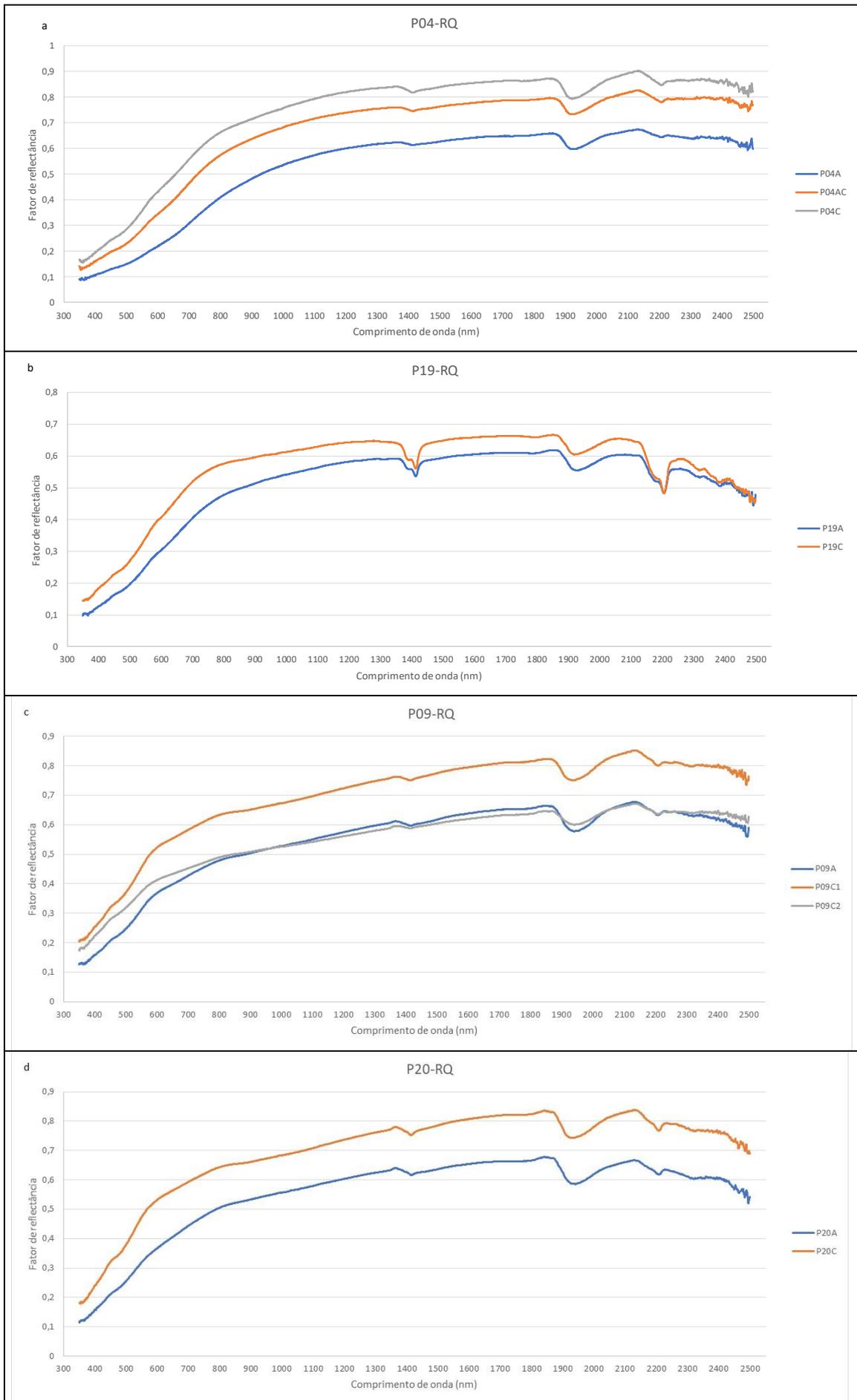
A reflectância espectral foi transformada em remoção contínua (CR) 24. Este pré-processamento remove as características contínuas dos espectros e é frequentemente usado para isolar características específicas de absorção. O CR cria um *continuum* ou envoltório semelhante ao encaixe de um elástico sobre o espectro original. O espectro é normalizado definindo o valor do envoltório para 100% de reflexão, onde o primeiro e o último valor do espectro removido do contínuo são iguais a 1. A força do CR é a sua capacidade de aumentar as profundidades de absorção corrigindo desvios aparentes do comprimento de onda espalhada, destacando bandas de absorção específicas de um espectro de reflectância (Mutanga et al., 2005).

Para melhor observação das feições de absorção nas curvas espectrais, foi obtida a segunda derivada das amostras, conforme Genú et al. (2010) e Poppiel et al. (2019).

Resultados e Discussão

As curvas espectrais dos solos indicaram diferenças quanto à intensidade e ocorrência das bandas de absorção (Figuras 2 a 9). Os NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS (RQ), apresentam textura arenosa, com mineralogia predominantemente de quartzo e baixos teores de carbono orgânico e óxidos de ferro, o que resultou em uma alta resposta espectral e forma convexa no intervalo de 500 a 1300 nm (Figura 2a, 2b, 2c e 2d), conforme descrito por Meneses & Madeira-Netto (2001) e observado por Galvão et al. (2008), Genú et al. (2010) e Tian & Philpot (2015). Nos horizontes superficiais A, a resposta espectral foi menor, quando comparados aos horizontes C, reflexo do maior teor de carbono orgânico nos horizontes superficiais, com uma exceção, para o perfil P09, em que esse padrão só foi observado na faixa do visível, quando comparado ao horizonte C2. Os P04, P09 e P20 tem coloração muito clara, esbranquiçada, com croma baixo, enquanto o P19 é menos arenoso, possui cores com croma alto e amareladas, o que resultou em uma resposta espectral um pouco menor e bandas de absorção mais bem definidas em 1400, 1900 e 2200 nm quando comparado aos demais desse grupo. O perfil P19 está associado a sedimentos do Grupo Barreiras, enquanto os demais a depósitos eólicos ou marinhos do Quaternário (Sousa & Valladares, 2015).

As cores do P19 são reflexos de traços de óxidos de ferro observados pela segunda derivada na faixa de 580nm (Figura 2e), conforme observado por Poppiel et al. (2019) em Latossolos. Os picos de absorção próximo a 2200nm indicam a presença de caulinita (Demattê et al., 2017) na fração argila presente no perfil (Figura 2b). Não foram observadas diferenças significativas nos espectros dos perfis de solos hidromórficos quando comparados aos não hidromórficos.



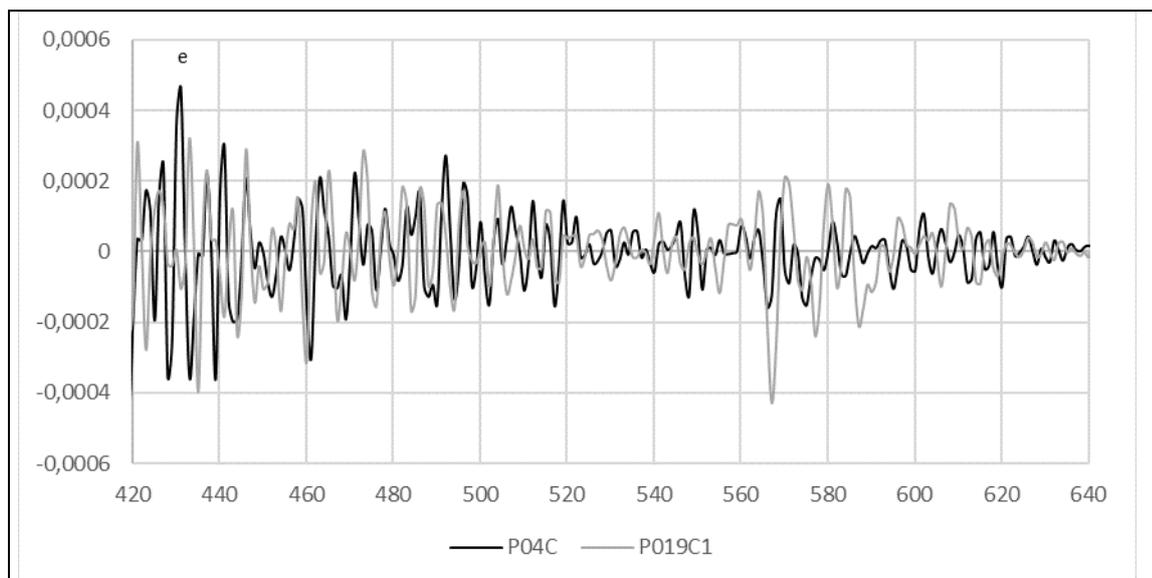


Figura 2. Curvas espectrais dos Neossolos Quartzarênicos da área de estudo e segunda derivada do P19: a. NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico sódico (P04), b. NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico (P19), c. NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Hidromórfico sálico sódico (P9), d. NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Hidromórfico típico (P20), e. segunda derivada do P19.

O P18, originário de sedimentos do Grupo Barreiras, classificado como Argissolo Amarelo, também apresentou alta resposta espectral devido aos baixos teores de carbono orgânico e textura média (Figura 3a), porém os horizontes A e E apresentam classe textural franco-arenosa e os horizontes B texturais são franco-argilo-arenosos, o que indica gradiente textural no perfil, definindo-o como Argissolo. No horizonte superficial A, com maior teor de carbono orgânico, foi observado menor albedo na faixa entre 350 e 1600 nm. Os horizontes B mostram feições de absorção de água pouco intensas em 1400 e 1900 nm, e mais intensas em 2200 nm, associada a mineralogia caulinítica desses solos (Fiorio, 2002; Demattê, 2002; Giarola et al., 2009; Demattê et al., 2017). Vale destacar a dissimetria na banda de 2200nm para os menores comprimentos de onda reforçando a presença de caulinita e destacando-a como mineral predominante na fração argila. A segunda derivada evidencia o predomínio de caulinita, entre 2200-2210nm (Figura 3b) conforme observado por Poppiel et al. (2019) em solos com caulinita.

No horizonte B são observadas bandas de absorção influenciadas pelos óxidos de ferro (goethita) entre 450 e 530 nm e outra entre 700 e 900 nm (Meneses & Madeira-Netto, 2001). O horizonte E se diferencia dos horizontes B pela forma convexa da curva entre 500 e 1300nm, indicando que a morfologia diferenciada observada na descrição do perfil de solo no campo, corresponde ao comportamento espectral. Portanto a análise espectral pode ser utilizada na classificação dos solos (Poppiel et al., 2019).

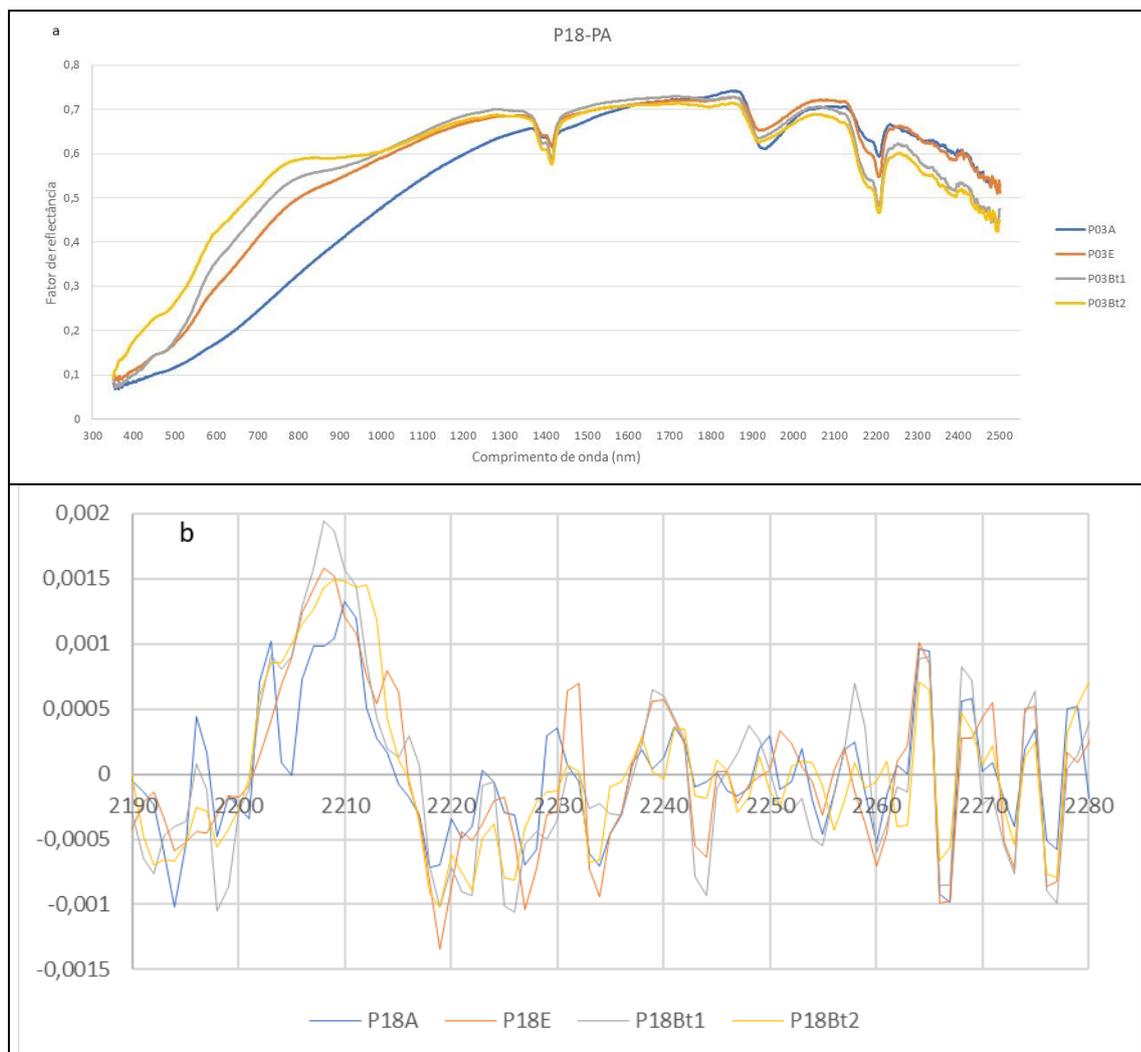


Figura 3. Curvas espectrais e segunda derivada do ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico (P18): a. Curva espectral, b. segunda derivada.

Os Neossolos Flúvicos (RY) apresentaram alta resposta espectral, principalmente em alguns horizontes subsuperficiais C, o baixo grau de desenvolvimento pedogenético refletiu em curvas com formas semelhantes, porém com maior absorção no horizonte subsuperficial C2 do P01, superficial A e subsuperficial C1 do P02, e superficial A do P21, refletindo os horizontes com maiores teores de carbono orgânico (Figuras 4a, 4b e 4c). A distribuição irregular ou errática do carbono orgânico nos perfis de RY é comum, reflexo da natureza das camadas depositadas morfogeneticamente (Santos et al., 2018). Foram observadas bandas de absorção de óxidos de ferro entre 450 e 530 nm e menos marcadas na faixa de 700 a 900 nm, indicando predomínio de goethita nos solos (Poppiel et al., 2019), que apresentam cores brunadas. Bandas de absorção de argilominerais são observadas em 1400, 1900 e 2200 nm, com maior absorção na banda próximo a 1900 nm, indicando predomínio de argilas 2:1 (Poppiel et al., 2019). Esses resultados indicam presença de argilas 2:1 expansíveis como as esmectitas, 2:1 como illita e 1:1 como a caulinita, corroborada pela assimetria na banda a 2200 nm indicando também a presença desse mineral 1:1 (Meneses & Madeira-Netto, 2001).

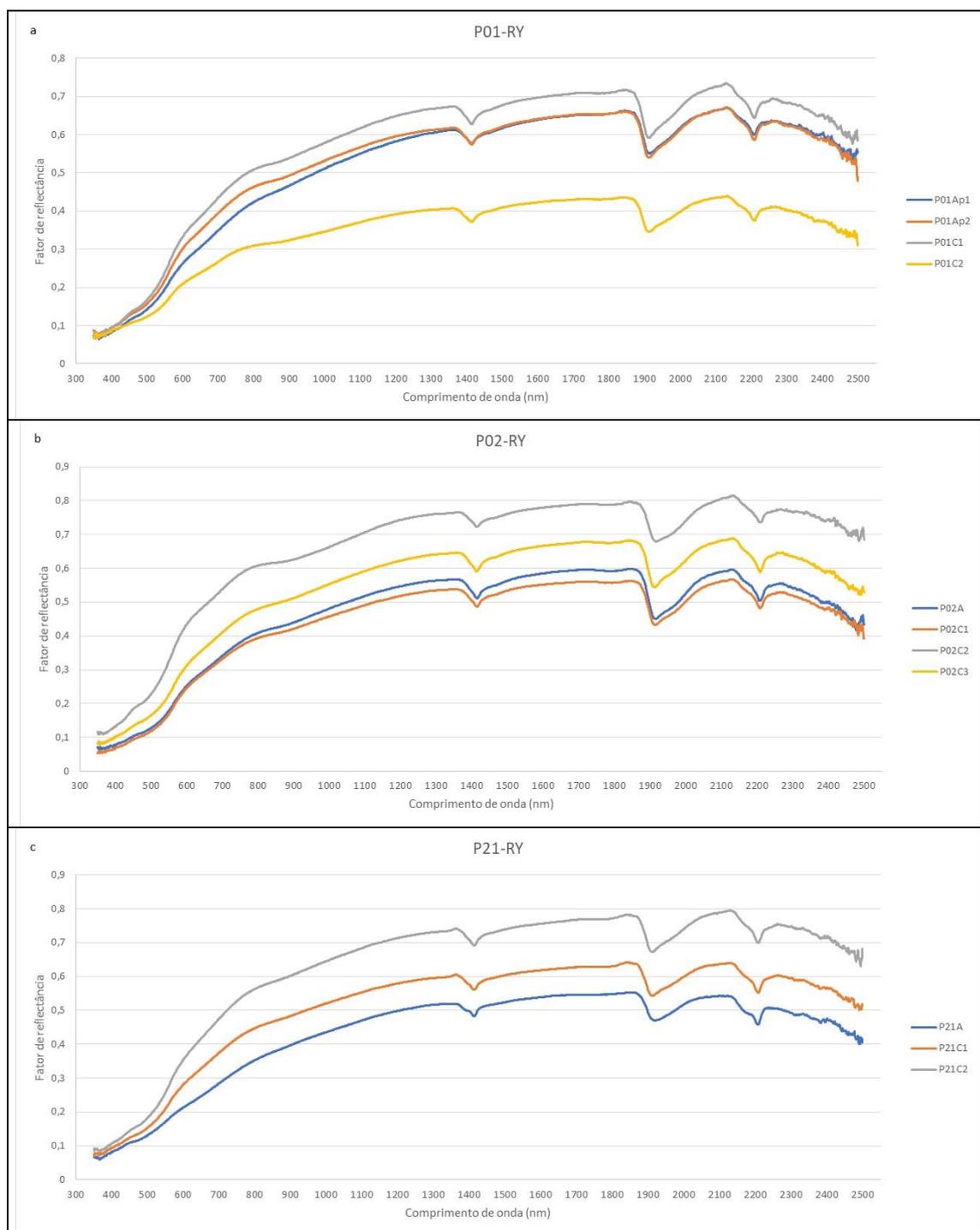


Figura 4. Curvas espectrais dos Neossolos Flúvicos da área de estudo: a. NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico (P01), b. NEOSSOLO FLÚVICO Sódico típico (P02), c. NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico (P21).

Para o Cambissolo Flúvico com caráter vértico (P15) foi observado um padrão de curvas semelhante aos RY, porém sendo mais marcada a absorção nas bandas indicativas de minerais 2:1 e sem observação de bandas de absorção de óxidos de ferro, muito provavelmente devido a maior restrição a drenagem do perfil (Figura 5). Apesar do horizonte A apresentar maiores teores de carbono orgânico e textura mais argilosa do que o Biv, a

absorção só foi maior na faixa do visível, sendo verificada ligeira maior reflexão nas demais bandas do espectro eletromagnético.

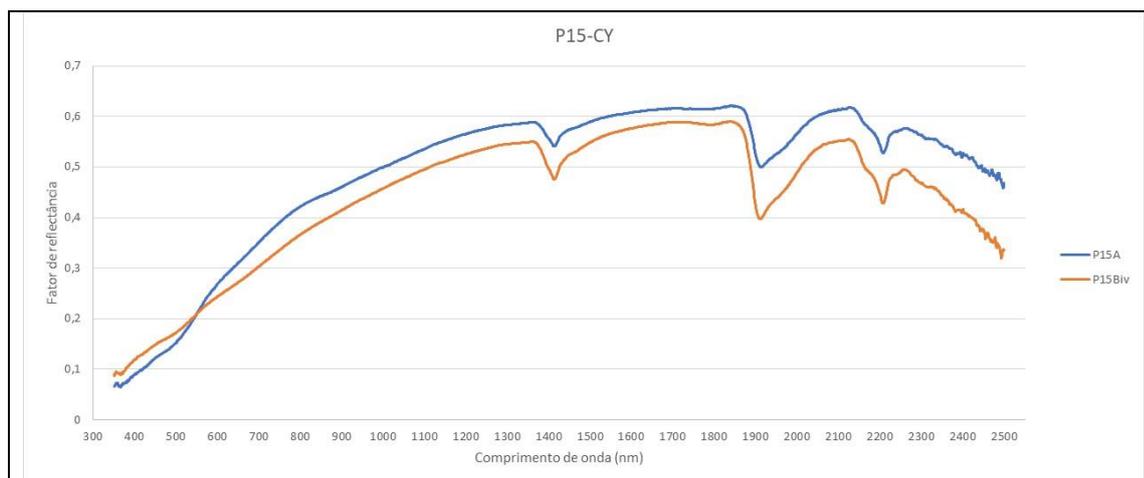


Figura 5. Curvas espectrais CAMBISSOLO FLÚVICO Sódico vertissólico salino (P15).

Para o Vertissolo Háplico (P12) verificou-se comportamento das curvas semelhante aos RY (Figura 6), porém os teores de argila mais elevados e a mineralogia predominantemente esmectítica resultam em absorções maiores nas faixas de 1400, 1900 e 2200 nm, essa última indicando presença de água nos minerais (Demattê et al., 2000; Genú et al., 2010). Segundo Meneses & Madeira-Netto (2001) a assimetria verificada a 2200nm indica presença de caulinita tanto no Vertissolo (Figura 6) como no Cambissolo (Figura 5). Para o horizonte superficial A verificou-se maior absorção, devido aos maiores teores de carbono orgânico. Dentre todos os espectros apresentados os horizontes A e Bv desse perfil foram os que tiveram menor fator de reflectância, inferiores a 0,5. Pode-se observar bandas de absorção de goethita entre 450 e 530nm (Poppiel et al., 2019).

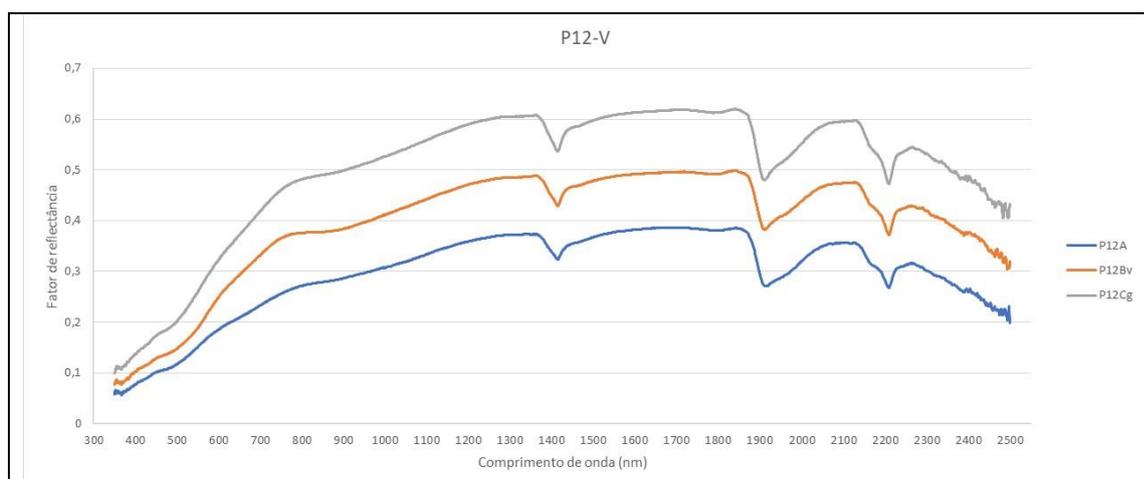


Figura 6. Curvas espectrais VERTISSOLO HÁPLICO Sódico típico (P12).

No Planossolo Nátrico (P03) verificaram-se curvas com comportamentos diferentes em alguns aspectos entre o horizonte A e os horizontes Btv (Figura 7). No horizonte A

observou-se elevada reflexão, com exceção da maior absorção entre 350 e 500 nm. Os horizontes Btv em função dos elevados teores de argila apresentaram menor reflexão em comparação ao horizonte A. As curvas no intervalo de 350 a 1300 nm tem formato convexo, sem a expressão de bandas indicadores da presença de óxidos de ferro (Meneses & Madeira-Netto, 2001; Genú et al., 2010), reflexo da drenagem imperfeita e do hidromorfismo que ocorre no perfil, reduzindo e solubilizando as formas de ferro (Kampf & Curi, 2012; Vodyanitskii & Shoba, 2017). As curvas apresentam bandas de forte absorção em 1400, 1900 e 2200 nm, indicando presença de argilominerais, predominantemente esmectitas, pela simetria na banda de 2200 nm (Meneses & Madeira-Netto, 2001).

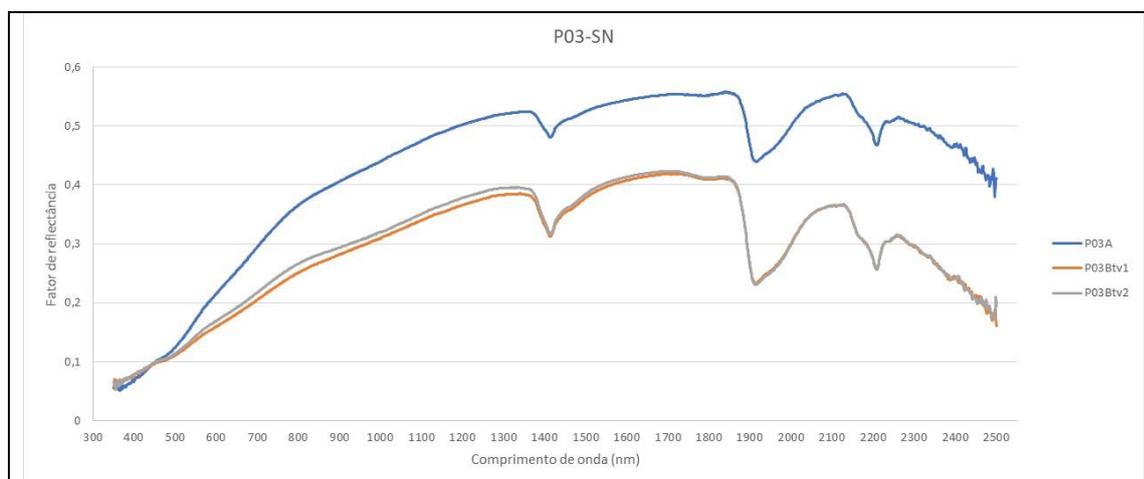
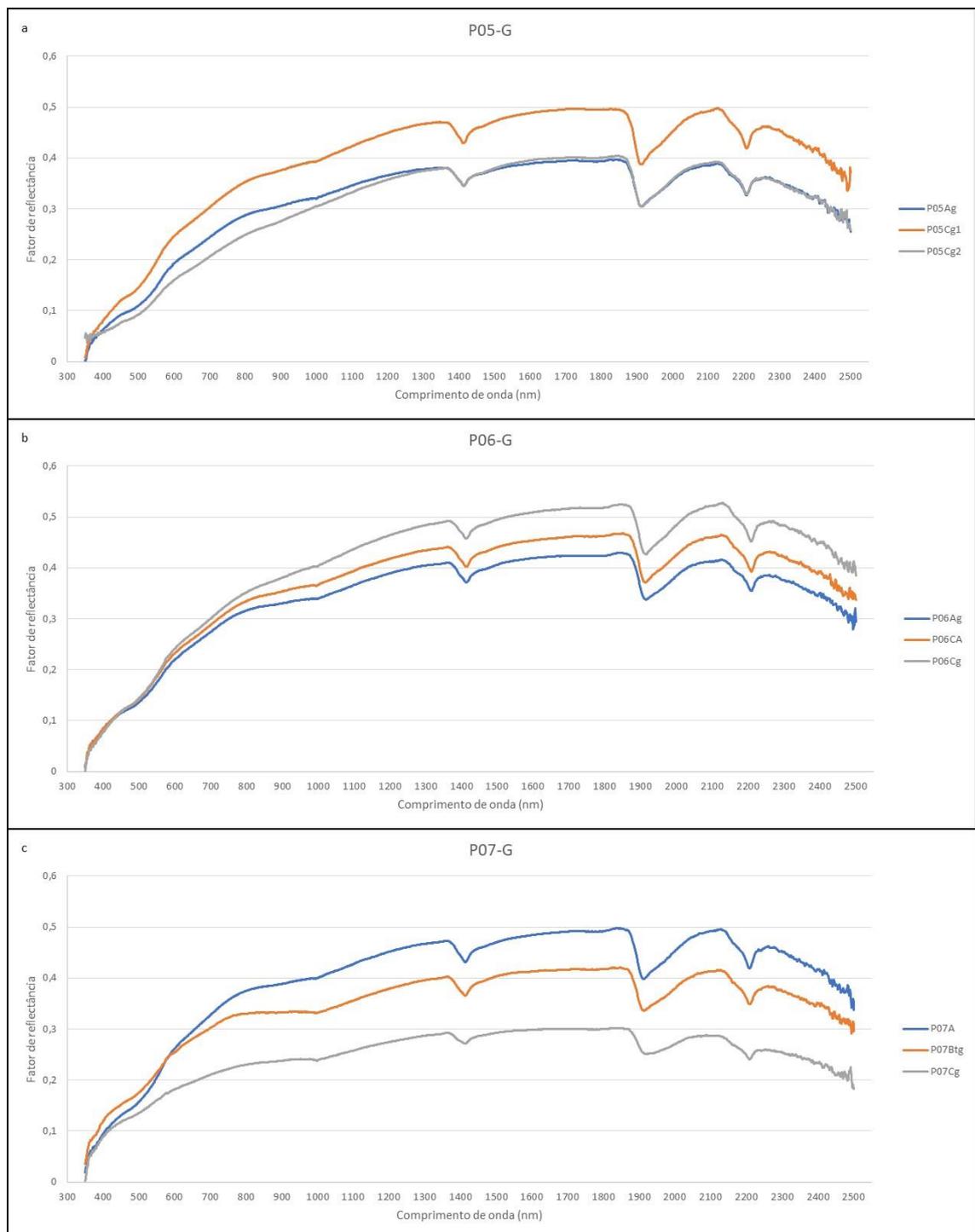


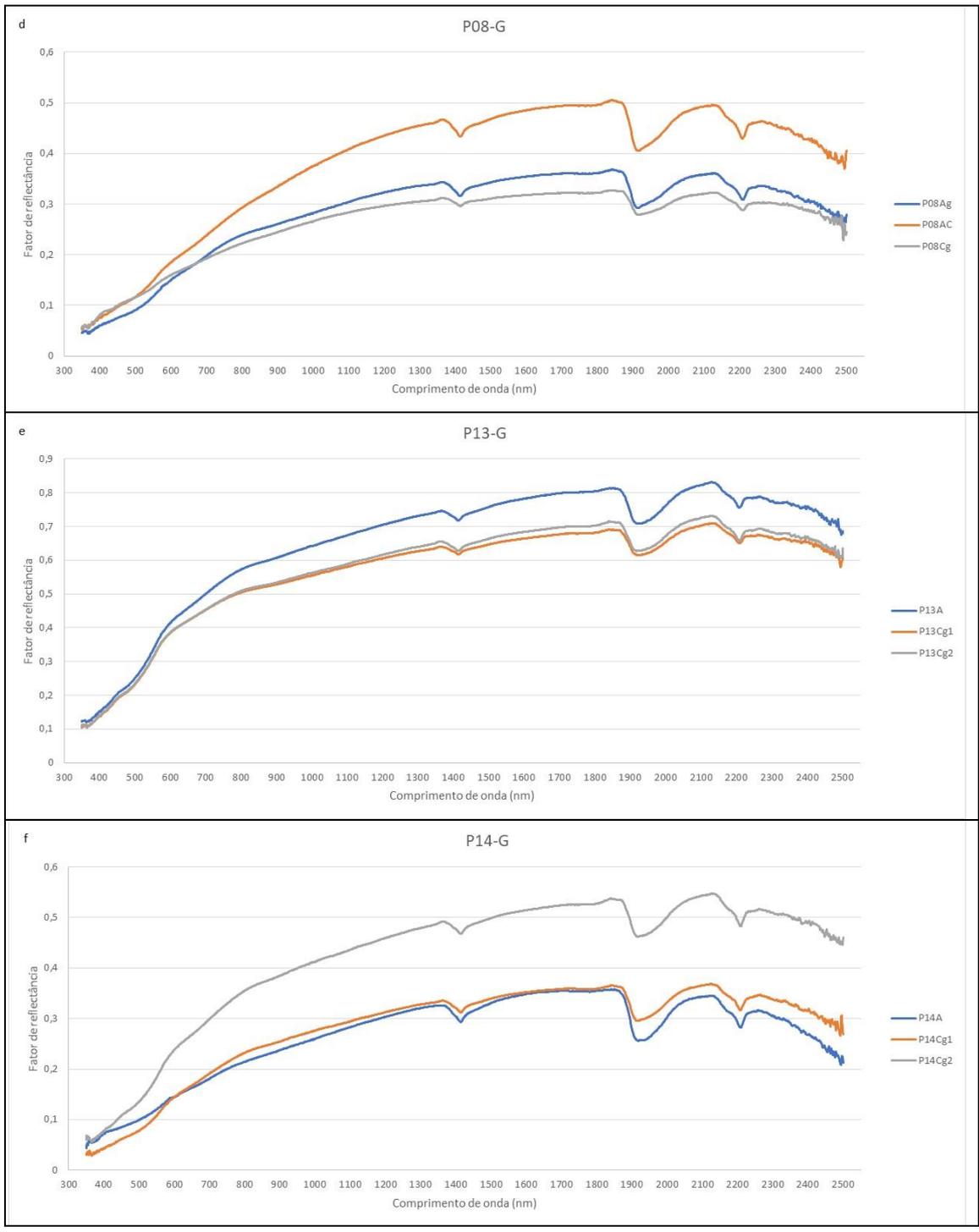
Figura 7. Curvas espectrais do PLANOSSOLO NÁTRICO Sáfico neofluvíssóico (P03).

Para os Gleissolos foi verificada textura e teor de carbono orgânico variados e com distribuições erráticas das camadas, assim como os RY, pois também são originários de sedimentos aluviais, isto é, têm caráter flúvico (Santos et al., 2018), maiores teores de argila e de carbono orgânico resultaram em maior absorção nas curvas espectrais. As curvas dos Gleissolos possuem formas convexas na faixa inicial do espectro semelhante ao que foi observado para Gleissolos em outros estudos (Genú et al., 2010; Demattê et al., 2017). As Figuras 8a, 8b, 8c, 8d, 8f e 8h referem-se a solos na sua maioria com altos teores de argila e silte, com exceção do P14 que apresenta textura média, predominantemente esmectíticos, com bandas de argilominerais 2:1 com alta absorção em 1400, 1900 e 2200nm (Meneses & Madeira-Netto, 2001), e menores valores do fator de reflectância, geralmente abaixo de 0,5.

Os perfis P13 (Gleissolo Háplico) e o P16 (Gleissolo Sáfico) apresentaram maiores fatores de reflexão quando comparados aos Gleissolos citados anteriormente, pois possuem textura indiscriminada, variando entre arenosa e média. As bandas de absorção dos argilominerais em 1400, 1900 e 2200 nm representam baixa absorção, reflexo dos baixos teores de argila (Figura 8e e 8g). O P16 classificado como Gleissolo Sáfico, apresenta

fragmentos de conchas e carapaças calcárias. O formato geral da curva (Figura 8g) é semelhante aos demais Gleissolos, porém com bandas de absorção nas faixas de 1430, 1930 e 2321 nm, indicando presença de carbonatos (Pedrosa et al., 2010), o que não foi observado nos outros Gleissolos de forma tão expressiva.





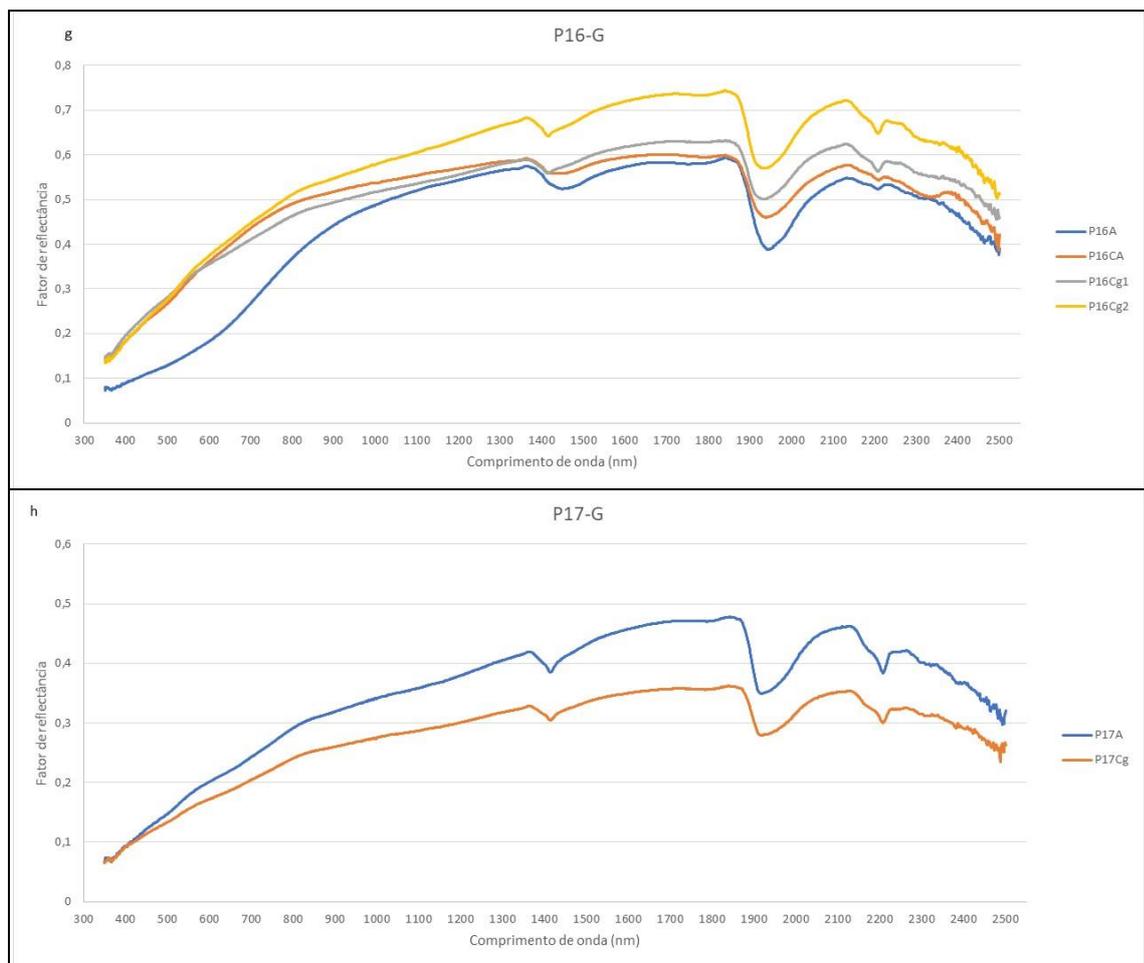


Figura 8. Curvas espectrais de Gleissolos na área de estudo: a. GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico neofluvissólico (P05), b. GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico neofluvissólico (P06), c. GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico (P07), d. GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico (P08), e. GLEISSOLO HÁPLICO Sódico neofluvissólico (P13), f. GLEISSOLO HÁPLICO Sódico neofluvissólico (P14), g. GLEISSOLO SÁLICO Sódico típico (P16) , h. GLEISSOLO SÁLICO Sódico típico (P17).

Nos Espodossolos os horizontes A e E têm comportamento espectral com curvas semelhantes aos dos Neossolos Quartzarênicos, refletindo a textura arenosa, com predomínio de quartzo, originários de sedimentos eólicos ou marinhos, com menor reflexão para os horizontes A em comparação com os horizontes E (Figuras 9a e 9b). No perfil P10 (Figura 9a) observa-se um comportamento diferente da curva do horizonte espódico Bh, em que na faixa do espectro de 350 a 900 nm, o comportamento é quase retilíneo, com muito fraca concavidade, enquanto as demais curvas nesse intervalo são convexas, padrão similar foi observado por Colombo et al. (2014), pesquisando Espodossolos nos Alpes italianos. A partir de 1300nm o fator de reflectância do horizonte Bh é o mais elevado no perfil P10 e a menor reflectância no horizonte A. Pinheiro et al. (2017) também observaram essa inversão entre os horizontes A e B de um Espodossolo da Amazônia brasileira, porém ocorreu a aproximadamente 600 nm, e na faixa do visível a curva tinha forma côncava. Destaca-se

ainda a baixa absorção a 1400, 1900 e 2200 nm, conforme pode-se observar na Figura 9 (Pinheiro et al., 2017).

O perfil P11, também classificado como Espodossolo apresenta uma composição mais complexa no que se refere aos horizontes, pois trata-se de um perfil formado por sedimentos arenosos de origem eólica, que soterraram um Gleissolo desenvolvido em planície, composto por um horizonte Hdb hístico sobrejacente a um horizonte glei, ambos horizontes com textura média. Nesse perfil os horizontes A e Bh tem curvas de comportamentos semelhantes, com menor fator de reflectância para o horizonte superficial A.

Portanto no perfil P11 o horizonte espódico Bh possui comportamento de horizonte superficial, o que pode ser reflexo da translocação ascendente de material orgânico, devido ao lençol freático, pela iluviação da matéria orgânica do horizonte hístico H abaixo do Bh. Padrão distinto do comumente observado no processo pedogenético de podzolização, em que a translocação do material orgânico se dá dos horizontes superficiais para os subsuperficiais (Kampf & Curi, 2012). O horizonte hístico apresentou os menores valores de reflectância, refletindo os elevados teores de carbono orgânico e o horizonte Cgb teve expressão pouco mais pronunciada de argilas a 1400, 1900 e 2200 nm (Meneses & Madeira-Netto, 2001).

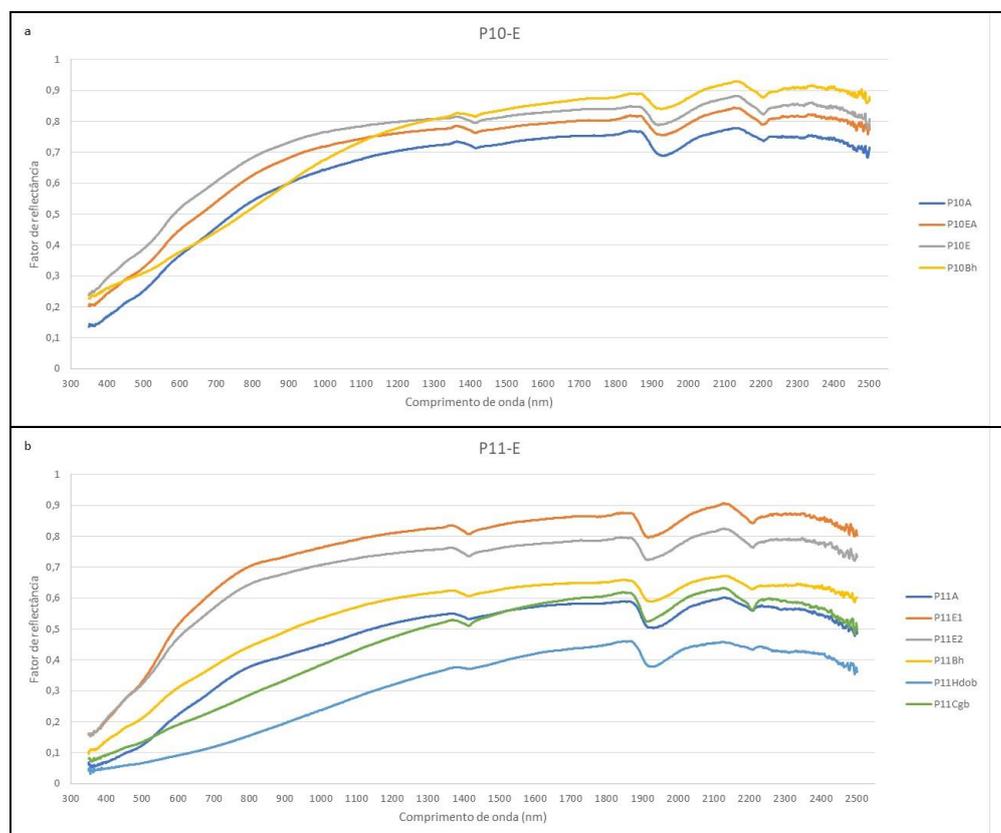


Figura 9. Curvas espectrais de Espodossolos da área de estudo: a. ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Hidromórfico arênico sódico (P10), b. ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Hidromórfico arênico neofluvisólico (P11).

Conclusões

As feições de absorção e os fatores de reflectância dos solos do litoral do Piauí são fortemente influenciados pela textura, teor de carbono orgânico e mineralogia. Por meio da análise das curvas espectrais foi possível fazer inferências sobre o teor de matéria orgânica, textura e tipos de horizontes diagnósticos dos perfis de solos estudados, como também relacionar com a presença de argilas de alta ou baixa atividade. Os solos da área de estudo possuem baixos teores de óxidos de ferro, mesmo assim naqueles mais cromados foi possível notar a presença de goethita, o que refletiu em solos com cores brunadas ou amareladas.

Agradecimentos

CNPq processos 443176/2014-0 e 301254/2017-6 e pelas bolsas de Produtividade em Pesquisa dos dois primeiros autores.. Ao grupo Geocis (<https://esalqgeocis.wixsite.com/geocis>), a FAPESP (2014-22262-0) e a CAPES pela bolsa do quarto autor.

Referências

- AMORIM, J. V. A.; VALLADARES, G. S.; DA SILVA, F. J. L. T.; LEAL, J. M. Uso da banda termal do TM/Landsat 5 e NDVI no Mapeamento Digital de Solos do Delta do Parnaíba–Piauí. *Revista de Geociências do Nordeste*, Natal, v.5, n. especial, p. 17-29, 2019.
- BELLINASSO, H.; DEMATTÊ, J.A.M.; ROMEIRO, S.A. Soil spectral library and its use in soil classification. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 861-870, 2010.
- CABRAL, L.J.R.S; VALLADARES, G.S; PEREIRA, M.G; PINHEIRO JÚNIOR, C.R.; LIMA, A.M.; FROTA, J.C.O; AMORIM, J.V.A. Classificação dos solos da Planície do Delta do Parnaíba, PI. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 12, n. 4, p.1466-1483, 2019.
- CEPRO. FUNDAÇÃO CENTRO DE PESQUISA ECONÔMICA E SOCIAL DO PIAUÍ. *Macrozoneamento costeiro do Piauí: relatório geoambiental e sócio-econômico*. Teresina: CEPRO, 1996. 221p.
- COLOMBO, C., PALUMBO, G., DI IORIO, E., SELBITTO, V. M., COMOLLI, R., STELLACCI, A. M., & CASTRIGNANÒ, A. Soil organic carbon variation in alpine landscape (Northern Italy) as evaluated by diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, Washington, v. 78, n. 3, p.794-804, 2014.
- DEMATTÊ, J. A. M.; CAMPOS, R. C.; ALVES, M. C. Avaliação espectral de solos desenvolvidos em uma topossequência de diabásio e folhelho da região de Piracicaba, SP. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 12, p.2447-2460, 2000.
- DEMATTÊ, J. A. M. Characterization and discrimination of soils by their electromagnetic energy. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 10, p.1445- 1458, 2002.

DEMATTÊ, J.A.M., TOLEDO, A.M.A., SIMÕES, M.S. Methodology for the recognition of three soils by using laboratory and orbital sensors. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, n. 5, p.877–889, 2004.

DEMATTÊ, J.A.M., ALVES, M.R., TERRA, F.S., BOSQUILIA, R.W.D., FONGARO, C.T., BARROS, P.P.S. Is it possible to classify topsoil texture using a sensor located 800 km away from the surface? *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 40, e0150335, 2016.

DEMATTÊ, J.A.M., HORÁK-TERRA, I., BEIRIGO, R.M., TERRA, F. DA S., MARQUES, K.P.P., FONGARO, C.T., SILVA, A.C., VIDAL-TORRADO, P. Genesis and properties of wetland soils by VIS-NIR-SWIR as a technique for environmental monitoring. *Journal of Environmental Management*, Amsterdam, v. 197, p.50–62, 2017.

DEMATTÊ, J. A., DOTTO, A. C., PAIVA, A. F., SATO, M. V., DALMOLIN, R. S., MARIA DO SOCORRO, B., ..., VALLADARES, G.S., ..., LACERDA, M. P. The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. *Geoderma*, Amsterdam, v. 354, p.113793, 2019.

DOTTO, A.C., DALMOLIN, R.S.D., TEN CATEN, A., GRUNWALD, S. A systematic study on the application of scatter-corrective and spectral-derivative preprocessing for multivariate prediction of soil organic carbon by Vis-NIR spectra. *Geoderma*, Amsterdam v. 314, p.262–274, 2018.

FIORIO, P. R. *Dados radiométricos obtidos nos níveis terrestre e orbital na avaliação de solos*. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. 213f.

GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.F.; COUTO, E.G.; ROBERTS, D.A. Relationships between the mineralogical and chemical composition of tropical soils and topography from hyperspectral remote sensing data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Amsterdam, v. 63, n. 2, p. 259–271, 2008.

GENÚ, A. M.; DEMATTÊ, J. A. M.; FIORIO, P. R. Análise espectral de solos da Região de Mogi-Guaçu (SP). *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 31, n. 1, p. 1235-1244, 2010.

GIAROLA, N. F. B., LIMA, H. D., ROMERO, R. E., BRINATTI, A. M., SILVA, A. D. Mineralogia e cristalografia da fração argila de horizontes coesos de solos nos Tabuleiros Costeiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 33, n. 01, p. 33-40, 2009.

IBGE/DGC. *Mapa de solos da folha AS.24 - Fortaleza*. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências - DGC / Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais – CREN, 2014. Escala 1:250.000.

JACOMINE, P. K. T., CAVALCANTI, A. C., PESSOA, S. C. P., BURGOS, N., MELO FILHO, H. F. R., LOPES, O. F., MEDEIROS, L. A. R. *Levantamento exploratório de reconhecimento de solos do Estado do Piauí*. Rio de Janeiro: Embrapa. SNLCS/SUDENE-DRN, v.1, 1986. 398p.

KÄMPF, N.; CURTI, N. Formação e evolução de solo (Pedogênese). In: KER, J. C.; SHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (Org.) *Pedologia: fundamentos*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. VII, p. 207-302.

- MCBRATNEY, A.B., MENDONÇA-SANTOS, M.L., MINASNY, B. On digital soil mapping. *Geoderma*, Amsterdam, v. 117, n. 1-2, p. 3–52, 2003.
- MCBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; ROSSEL, R.V. Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis. *Geoderma*, Amsterdam, v. 136, n. 1-2, p. 272-278, 2006.
- MENDES, W. S., DEMATTÊ, J. A., ROSIN, N. A., DA SILVA TERRA, F., POPPIEL, R. R., URBINA-SALAZAR, D. F., ... & VALLADARES, G. S. The Brazilian soil mid-infrared spectral library: the power of the fundamental range. *Geoderma*, v.415, p. 115776, 2022.
- MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. *Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília: Editora Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 262p.
- MUTANGA, O.; SKIDMORE, A.K.; KUMAR, L.; FERWERDA, J. Estimating tropical pasture quality at canopy level using band depth analysis with continuum removal in the visible domain. *International Journal Remote Sensing*, Londres, v. 26, n. 6, p. 1093-1108. 2006.
- NANNI, M.R., DEMATTÊ, J.A.M. Soil line behavior obtained by laboratorial spectroradiometry for different soil classes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, 1031–1038. 2006.
- PEDROSA, S.A.; MENESES, P.R.; CARMELO, A.C. Espectrorradiometria de reflectância de rochas carbonáticas na região do infravermelho de ondas curtas. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 40, n.4, p.593-599. 2010.
- PINHEIRO, É., CEDDIA, M., CLINGENSMITH, C., GRUNWALD, S., VASQUES, G. Prediction of soil physical and chemical properties by visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy in the central Amazon. *Remote Sensing*, Basel, v. 9, n.4, p. 1-22, 2017.
- PIZARRO, M.A.; EPIPHANIO, J.C.N.; GALVÃO, L.S. Caracterização mineralógica de solos tropicais por sensoriamento remoto hiperespectral. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília v. 36, n. 10, p. 1277-1286, 2001.
- POPPIEL, R. R., LACERDA, M. P., DEMATTÊ, J. A., OLIVEIRA JR, M. P., GALLO, B. C., SAFANELLI, J. L. Pedology and soil class mapping from proximal and remote sensed data. *Geoderma*, Amsterdam, v. 348, p. 189-206, 2019.
- PORTELA, M. G. T., ESPINDOLA, G. M., VALLADARES, G. S., AMORIM, J. V. A., FROTA, J. C. O. Vegetation biomass and carbon stocks in the Parnaíba River Delta, NE Brazil. *Wetlands Ecology and Management*, v.28, n.4, p. 607-622, 2020.
- ROMERO, D.J., BEN-DOR, E., DEMATTE, J.A.M., SOUZA, A.B.E., VICENTE, L.E., TAVARES, T.R., ..., GALLO, B. C.. Internal soil standard method for the Brazilian soil spectral library: performance and proximate analysis. *Geoderma*, Amsterdam, v. 312, p. 95–103, 2018.

SANTOS, H.G., JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H.C., OLIVEIRA, V.A., OLIVEIRA, J.B., COELHO, M.R., LUMBRERAS, J.F., CUNHA, T.J.F. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 356 p.

SANTOS, R.D., LEMOS, R.C., SANTOS, H.G., KER, J.C., ANJOS, L.H.C. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 6. ed. Vicosa, SBCS, 2015. 100 p.

SOUSA, R. S.; VALLADARES, G. S. Mapeamento dos depósitos sedimentares da planície costeira do estado do Piauí. *Revista Equador*, Teresina, v. 4, n. 3, p. 862-869, 2015.

SOUSA JUNIOR, J.G.A.; DEMATTÊ, J.A.M.; GENÚ, A.M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 727-738, 2008.

SRIVASTAVA, R. Applications of Remote Sensing in Land Resource Inventory and Mapping. In: *Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring and Management*. Cham, Springer, 2018. p. 323-334.

TENG, H., VISCARRA ROSSEL, R.A., SHI, Z., BEHRENS, T. Updating a national soil classification with spectroscopic predictions and digital soil mapping. *Catena*, Amsterdam, v. 164, p. 125–134, 2018.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. Ed. Brasília: Embrapa. 2017. 573p.

TERRA, F.S., DEMATTÊ, J.A.M., VISCARRA ROSSEL, R.A., 2018. Proximal spectral sensing in pedological assessments: Vis–NIR spectra for soil classification based on weathering and pedogenesis. *Geoderma*, Amsterdam, v. 318, p. 123–136, 2018.

TIAN, J., PHILPOT, W.D. Relationship between surface soil water content, evaporation rate, and water absorption band depths in SWIR reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment*, Amsterdam, v. 169, p. 280–289, 2015.

VISCARRA ROSSEL, R.A., BEHRENS, B.-D., BROWN, D.J., DEMATTÊ, J.A.M., SHEPHERD, K.D., SHI, Z., ..., AÏCHI, H. A global spectral library to characterize the world's soil. *Earth-Science Reviews*, Amsterdam, v.155, p. 198–230, 2016.

VODYANITSKII, Y.N.; SHOBA, A.S. Resistance of Mineral Soils to Fe(III) Reduction. *Moscow University Soil Science Bulletin*, Moscow, v. 72, n. 4, p. 143–150, 2017.