



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

REBECA MENDES FEITOZA

**CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE HORIZONTES COM E SEM CARÁTER
COESO**

FORTALEZA

2023

REBECA MENDES FEITOZA

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE HORIZONTES COM E SEM CARÁTER COESO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Pedologia.

Orientador: Prof. Dr. Raul Shiso Toma.

FORTALEZA

2023

REBECA MENDES FEITOZA

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE HORIZONTES COM E SEM CARÁTER COESO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Pedologia.

Aprovada em: 11/04/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raul Shiso Toma (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fabrício da Silva Terra
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

À minha mãe, Gerusa Maria de Sousa Mendes.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo apoio e carinho.

Ao Prof. Dr. Raul Shiso Toma, pela paciência, compreensão e por ser um excelente orientador.

Aos professores participantes da banca examinadora, Dr. Ricardo Espíndola Romero, Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota e Dr. Fabrício da Silva Terra pelas contribuições não só para esse trabalho, mas para minha formação como Agrônoma e pesquisadora.

Aos colegas da turma de mestrado pelo companheirismo durante essa caminhada.

Aos demais professores, estudantes e funcionários do Departamento de Ciências do Solo que tão generosamente estenderam a mão e ajudaram na construção desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

“Há verdadeiramente duas coisas diferentes: saber e crer que se sabe. A ciência consiste em saber; em crer que se sabe reside a ignorância.” Hipócrates

RESUMO

Os horizontes com caráter coeso são horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, que variam de muito duros a extremamente duros quando secos, passando a friáveis ou firmes quando úmidos. Solos com o caráter coeso estão presentes principalmente na região dos Tabuleiros Costeiros, e podem prejudicar o desenvolvimento das culturas. A gênese do caráter coeso ainda é discutida e já foi associada a cimentação temporária causada pela presença de compostos amorfos. A espectroscopia de reflectância é uma técnica que permite caracterizar o comportamento espectral dos solos, contribuindo na geração de um banco de dados espectrais. Diversos estudos têm avaliado atributos do solo usando a espectroscopia de reflectância, mas ainda não há estudos específicos com o caráter coeso. Diante do exposto, esse estudo teve como objetivo avaliar descritivamente as variações dos dados espectrais de horizontes com e sem o caráter coeso dos solos coletados, avaliando também as diferenças após a retirada do material amorfo. Amostras de solos dos estados de Maranhão, Ceará, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia foram coletados, sendo dois horizontes de cada solo, com e sem o caráter coeso. Análises químicas e físicas para a determinação do pH, cálcio, magnésio fósforo, sódio, potássio, alumínio, acidez potencial, cálculo da CTC e da saturação por bases, teor de carbono orgânico, extração dos compostos amorfos, granulometria e fracionamento da areia foram realizadas para a caracterização dos horizontes, assim como a coleta de dados espectrais das amostras, utilizando-se o espectrorradiômetro FieldSpec Pro FR. As curvas espectrais foram avaliadas pela sua forma geral ao longo do espectro eletromagnético, levando em consideração os resultados das análises químicas e físicas. Para realçar os picos de absorção, foi aplicada a primeira derivada. Os dados também foram avaliados usando a análise de agrupamento e de componente principal (ACP) para identificar amostras com base espectral semelhantes. Com a espectroscopia de reflectância foi possível identificar diferenças entre as curvas espectrais dos horizontes com e sem caráter coeso nos solos analisados, principalmente quanto à intensidade de reflectância. O uso da primeira derivada permitiu destacar as principais feições observadas nos horizontes dos solos estudados referentes à presença dos óxidos de ferro, grupo OH e caulinita. Quanto à extração do material amorfo, a reflectância também foi a maior diferença observada, com o rebaixamento geral das curvas. A análise de agrupamento e a ACP confirmaram as semelhanças na forma geral das curvas, sendo a intensidade de reflectância o maior fator para distinção dos grupos.

Palavras-chave: compostos amorfos; espectroscopia de reflectância; feições de absorção.

ABSTRACT

Horizons with a cohesive character are dense subsurface pedogenetic horizons, which vary from very hard to extremely hard when dry, becoming friable or firm when wet. Soils with a cohesive character are present mainly in the Coastal Tabuleiros region, and can harm the development of crops. The genesis of the cohesive character is still debated and has been associated with temporary cementation caused by the presence of amorphous compounds. Reflectance spectroscopy is a technique that allows the spectral behavior of soils to be characterized, contributing to the generation of a spectral database. Several studies have evaluated soil attributes using reflectance spectroscopy, but there are still no specific studies with a cohesive character. Given the above, this study aimed to descriptively evaluate the variations in spectral data of horizons with and without the cohesive character of the soils collected, also evaluating the differences after removing the amorphous material. Soil samples from the states of Maranhão, Ceará, Pernambuco, Alagoas, Sergipe and Bahia were collected, with two horizons of each soil, with and without the cohesive character. Chemical and physical analyzes to determine pH, calcium, magnesium, phosphorus, sodium, potassium, aluminum, potential acidity, calculation of CEC and base saturation, organic carbon content, extraction of amorphous compounds, granulometry and fractionation of the sand were carried out for the characterization of the horizons, as well as the collection of spectral data from the samples, using the FieldSpec Pro FR spectroradiometer. The spectral curves were evaluated for their general shape across the electromagnetic spectrum, taking into account the results of chemical and physical analyses. To highlight the absorption peaks, the first derivative was applied. Data were also evaluated using cluster and principal component (PCA) analysis to identify spectrally similar samples. With reflectance spectroscopy it was possible to identify differences between the spectral curves of horizons with and without a cohesive character in the analyzed soils, mainly in terms of reflectance intensity. The use of the first derivative allowed highlighting the main features observed in the horizons of the studied soils regarding the presence of iron oxides, OH group and kaolinite. Regarding the extraction of amorphous material, reflectance was also the biggest difference observed, with a general lowering of the curves. Cluster analysis and PCA confirmed the similarities in the general shape of the curves, with reflectance intensity being the biggest factor for distinguishing the groups.

Keywords: amorphous compounds; reflectance spectroscopy; absorption features.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delimitação de ocorrência dos Tabuleiros Costeiros (vermelho) e Baixada Litorânea (laranja) na região Nordeste	16
Figura 2 – Locais de coleta dos solos estudados	24
Figura 3 – Fluxograma representativo da metodologia utilizada	26
Figura 4 – Geometria da aquisição de dados espectrais com leitura de sonda por contato	29
Figura 5 – Curvas espectrais dos horizontes coeso e não coeso no Maranhão antes e após extração do material amorfo	37
Figura 6 – Curvas espectrais dos horizontes coeso e não coeso no Ceará (CE1) antes e após extração do material amorfo	38
Figura 7 – Solo ao ser retirado da estufa e após o peneiramento	39
Figura 8 – Curvas espectrais dos horizontes coeso e não coeso estudados no segundo perfil do Ceará (CE2) antes e após extração do material amorfo	40
Figura 9 – Curvas espectrais dos horizontes coeso e não coeso estudados em Pernambuco antes e após extração do material amorfo	40
Figura 10 – Curvas espectrais dos horizontes coeso e não coeso estudados em Sergipe antes e após extração do material amorfo	41
Figura 11 – Curvas espectrais dos horizontes coeso e não coeso estudados em Alagoas antes e após extração do material amorfo	42
Figura 12 – Curvas espectrais dos horizontes estudados na Bahia antes e após extração do material amorfo	43
Figura 13 – Primeira derivada dos horizontes coesos e não coesos antes e depois da extração em todos os Estados estudados	45
Figura 14 – Dendrograma de distribuição dos horizontes coesos e não coesos antes e depois da extração em todos os Estados estudados, com indicação dos grupos identificados para a altura de corte considerada	49
Figura 15 – Gráfico de dispersão com duas componentes principais	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Locais das coletas, tipos de solo e identificação dos horizontes	25
Tabela 2 – Descrição morfológica dos horizontes com caráter coeso nos solos estudados	25
Tabela 3 – Distribuição da fração areia com a correspondência na escala ϕ	27
Tabela 4 – Resultado das análises químicas	30
Tabela 5 – Valores de argila, silte, areia e a classificação textural	31
Tabela 6 – Grau de seleção das areias de acordo com os parâmetros de Folk e Wald (1957)	34
Tabela 7 – Teores de ferro silício e alumínio extraídos dos horizontes estudados	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	HIPÓTESE	15
3	OBJETIVO GERAL	15
3.1	Objetivos específicos	15
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1	Caráter Coeso	16
4.2	Sensoriamento Próximo	19
4.2.1	<i>Espectroscopia de reflectância</i>	20
4.2.2	<i>Comportamento Espectral do Solo</i>	21
4.2.3	<i>Biblioteca Espectral</i>	23
5	MATERIAL E MÉTODOS	24
5.1	Granulometria	26
5.2	Fracionamento da Areia	27
5.3	Análises Químicas	27
5.3.1	<i>Extração do Material Amorfo</i>	28
5.4	Dados Espectrais	29
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
6.1	Granulometria e Fracionamento da areia	30
6.2	Análises Químicas	32
6.2.1	<i>Extração do Material Amorfo</i>	35
6.3	Dados Espectrais	36
6.3.1	<i>Análise da primeira derivada</i>	43
6.3.2	<i>Análise de Agrupamento</i>	50
6.3.2	<i>Análise de componentes principais</i>	52
7	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O termo caráter coeso, de acordo com Santos *et al.* (2018), é utilizado para designar horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, muito resistentes à penetração de faca ou martelo pedológico e que veriam de muito duros a extremamente duros quando secos, passando a friáveis ou firmes quando úmidos. A presença desse atributo, no Brasil, vem sendo relacionada a região dos Tabuleiros Costeiros, que constitui uma extensa faixa sedimentar costeira, sendo representados geologicamente pelos sedimentos do Grupo Barreiras (JACOMINE, 2001; GIAROLA, SILVA, 2002).

O potencial para a exploração agrícola dos Tabuleiros Costeiros está relacionado à topografia plana favorável à mecanização e à proximidade de grandes centros consumidores (SANTANA *et al.*, 2020). Na região Nordeste, exercem papel relevante no cenário econômico com destaque para culturas agrícolas como a cana de açúcar, mandioca, banana e coco, além do uso para pastagem (CRUZ *et al.* 2017). Porém, os solos da região podem apresentar como limitação a ocorrência do horizonte com caráter coeso, dificultando a penetração das raízes e alterando a dinâmica da água e do ar no solo (ARAÚJO *et al.*, 2018).

Estudos recentes visando entender a origem dos solos com caráter coeso, apontam diferentes processos envolvidos com a gênese desse caráter, como o empacotamento das partículas devido a presença de materiais do tamanho areia pobremente selecionada (BEZERRA *et al.*, 2014), o entupimento dos poros por argila iluvial (CORRÊA *et al.*, 2008), a cimentação temporária causada por compostos amorfos (VIEIRA *et al.*, 2012) e, ainda, o adensamento resultante da modificação da estrutura do solo pela alternância de ciclos de umedecimento e secagem em regiões com estações bem definidas (RIBEIRO, 2001).

A determinação dos possíveis agentes causadores da coesão dos solos é muito importante, uma vez que o conhecimento mais detalhado das características e dos processos de formação desses horizontes pode auxiliar no melhor entendimento de sua gênese. O sensoriamento próximo através da técnica de espectroscopia de reflectância vêm sendo utilizado no estudo da composição de solos em laboratório, relacionando dados espectrais e os elementos causadores de suas feições de absorção com características pedológicas dos solos (TERRA, 2011), podendo ser uma ferramenta importante no estudo dos solos com caráter coeso.

Diversos trabalhos envolvendo avaliações de atributos do solo utilizando essa técnica vêm sendo realizados nas últimas décadas. Liu *et al.* (2018) estimaram a quantidade de carbono orgânico em diferentes materiais parentais; Nocita *et al.* (2013) quantificaram o

efeito da umidade do solo na precisão das estimativas de carbono orgânico; Lu *et al.* (2013) analisaram carbono orgânico, fósforo, pH e capacidade de troca de cátions, aliado ao mapeamento desses atributos no solo; Martins *et al.* (2014), avaliaram, além dos atributos químicos, os atributos físicos, teores de areia, silte e argila. Porém, até o momento, não se tem relato do uso dessa técnica no estudo de solos com o caráter coeso.

A análise do solo realizada por sensoriamento próximo se dá, principalmente, por meio da avaliação do seu comportamento ou assinatura espectral, ou seja, o produto da interação entre o solo e a radiação eletromagnética (REM) (NANNI; DEMATTÊ, 2006). A espectroscopia de reflectância, por sua vez, é uma técnica que tem a função de medir, em diferentes comprimentos de onda, a energia eletromagnética refletida da superfície dos objetos (DEMATTÊ; TERRA, 2014).

A energia irradiada, que interage com o solo e é refletida por este em diferentes comprimentos de onda, é captada por sensores, originando resultados sob a forma gráfica denominadas curvas de reflectância espectral, ou apenas curvas espectrais (DEMATTÊ *et al.*, 2015). Por apresentarem constituições diversas, os diferentes tipos de solos podem gerar diferentes representações de curvas de reflectância, inerentes às suas características. Em função da interação entre os constituintes do solo e o espectro eletromagnético, é possível a observação de bandas de absorção nas curvas de reflectância ou também conhecidas como feições particulares (DALMOLIN *et al.*, 2005).

São vários os fatores que podem afetar o comportamento espectral do solo, podendo-se destacar como principais: a quantidade de matéria orgânica e óxidos de ferro; a granulometria, a rugosidade da superfície e a umidade (EPIPHANIO *et al.*, 1992; MULDER *et al.*, 2011). Devido a variabilidade desses fatores, cada solo pode apresentar uma constituição diferente, favorecendo o comportamento distinto ao longo dos comprimentos de onda da sua curva espectral.

O sensoriamento próximo permite caracterizar o comportamento espectral dos solos assim como, por meio de dados espectrais, estimar atributos físicos e químicos. Em ambos os casos, a existência de um banco de dados espectrais, também chamado de biblioteca espectral, serve de base para padronizar tanto o comportamento espectral dos solos, como a geração de modelos de estimativa de seus atributos (SHEPHERD; WALSH, 2002).

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo avaliar descritivamente as variações dos dados espectrais de horizontes com e sem o caráter coeso dos solos coletados de diferentes estados do Brasil, avaliando também as diferenças após a extração do material amorfo.

2 HIPÓTESE

A espectroscopia de reflectância na faixa do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas permitirá a identificação de diferenças entre os horizontes com e sem o caráter coeso e diferenças também no mesmo horizonte antes e depois da retirada do material amorfo.

3 OBJETIVO GERAL

Avaliar descritivamente as variações dos dados espectrais dos horizontes com e sem o caráter coeso dos solos coletados de diferentes estados do Brasil, considerando também a presença do material amorfo.

3.1 Objetivos Específicos

Caracterização quanto aos atributos físicos e químicos dos horizontes com e sem caráter coeso dos solos coletados de diferentes estados do Brasil.

Desenvolver bibliotecas espectrais vis-NIR de horizontes com e sem o caráter coeso dos solos coletados.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Caráter Coeso

O atual sistema taxonômico brasileiro (SANTOS *et al.*, 2018) estabelece que os horizontes coesos são horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, muito resistentes à penetração de faca ou martelo pedológico e que são de muito duros a extremamente duros quando secos, passando a friáveis ou firmes quando úmidos. Apresentam textura média, argilosa ou muito argilosa e, em condições naturais, têm uma fraca organização estrutural, sendo geralmente maciços ou com tendência à formação de blocos.

Solos com horizontes com caráter coeso estão intimamente relacionados com depósitos sedimentares de textura média a argilosa, muito intemperizados, representados pela Formação Barreiras, que constitui a unidade geomorfológica dos Tabuleiros Costeiros (Figura 1) (LIMA NETO *et al.*, 2009).

Figura 1 - Delimitação da área de ocorrência dos Tabuleiros Costeiros e Baixada Litorânea na região Nordeste do país.



Fonte: EMBRAPA, 2015.

No Nordeste, a região dos Tabuleiros Costeiros exerce papel relevante no cenário econômico com destaque para culturas agrícolas como a cana-de-açúcar, mandioca, banana e coco, além do uso para pastagem (CRUZ *et al.*, 2017). A fruticultura é uma atividade significativa do agronegócio nesse ecossistema, pois está ligada a estruturas de transporte, armazenagem e distribuição (CINTRA *et al.*, 2004); o potencial desse ambiente para a exploração agrícola está relacionado à topografia favorável, à mecanização e à proximidade de grandes centros consumidores (SANTANA *et al.*, 2020), mas apresenta limitações como a distribuição irregular das chuvas, a baixa fertilidade dos solos, em geral, além da ocorrência dos horizontes com caráter coeso (CRUZ *et al.*, 2017).

Horizontes com o caráter coeso se apresentam como limitação para o desenvolvimento das raízes para a maioria das culturas, devido à resistência à penetração, situação que pode ser agravada com o uso intensivo e perda da camada mais superficial do solo (ARAÚJO *et al.*, 2018). A depender da posição que a camada adensada ocupa na paisagem e da profundidade e grau desse adensamento, as propriedades físicas e hídricas do solo são afetadas em intensidade variável, o que pode limitar não só a absorção de água, mas também de nutrientes pelas plantas (LIRA *et al.*, 2016).

As condições climáticas que ocorrem nos Tabuleiros Costeiros, aliadas ao relevo plano ou suave ondulado e ao material de origem, formado por sedimentos detríticos, favorecem não só a formação de horizonte com caráter coeso, mas também de horizontes fragipã e duripã, ainda que em menor extensão (MOREAU, 2001). Horizontes fragipãs também têm altos níveis de coesão, mas apresentam quebracidade quando uma amostra úmida é submetida à compressão; diferentes dos solos coesos, que se deformam lentamente, os duripãs apresentam cimentação ainda mais forte; quando úmidos, apresentam consistência muito firme ou extremamente firme e são sempre quebradiços, mesmo após prolongado umedecimento (SANTOS *et al.*, 2018).

A importância de se determinar os possíveis agentes causadores das referidas coesões é muito grande, uma vez que esse conhecimento pode contribuir na definição de práticas de manejo mais adequadas para esses solos (MOREAU, 2001).

Estudos recentes visando entender a origem dos solos com caráter coeso apontam diferentes processos envolvidos com a gênese desse caráter; como o empacotamento após o arranjo das partículas, devido à presença de materiais do tamanho areia pobremente selecionados (BEZERRA *et al.*, 2014), no entanto, Araújo *et al.* (2018) ressaltam que a diversidade de tamanho das partículas de areia, em que partículas menores preenchem os espaços vazios deixados pelas maiores reduzindo a porosidade do solo certamente contribui

para a coesão dos horizontes, mas não são determinantes, sendo necessária a presença de um agente cimentante.

A gibbsita, os óxidos de Fe (hematita, goethita) e a matéria orgânica tendem a desorganizar as partículas no seu nível microestrutural. Isso significa que maiores teores desses componentes correspondem a um arranjo mais casualizado das partículas de argilas silicatadas, que têm geralmente a forma laminar, diminuindo a coesão e adesão entre elas (RESENDE *et al.*, 2014). Lima *et al.* (2004) encontraram entre os horizontes de acumulação de argila, o menor teor de óxido de ferro no horizonte com caráter coeso, evidenciando uma relação inversa entre o teor desse componente e o grau de coesão.

A predominância da caulinita na fração argila contribui para a coesão dos solos de Tabuleiros, visto que a sua forma placóide favorece o ajuste cerrado entre as partículas minerais. Além da predominância da caulinita, a ausência de gibbsita é importante para a formação desse caráter (MOREAU, 2001).

A iluviação de argilas muito finas, com diâmetro inferior a 0,2 μm , obstruindo a rede porosa (CORRÊA *et al.*, 2008) também está associada à presença do caráter coeso; o adensamento natural do material que constitui esse horizonte, devido ao acúmulo de materiais finos e do arranjo das partículas, causa o aumento da microporosidade, restringe a permeabilidade e favorece a precipitação de agentes cimentantes (GIAROLA e SILVA, 2002).

Vieira *et al.* (2012) atribuem a formação do horizonte coeso à presença de compostos de baixa cristalinidade (Fe, Al e Si), que apresentam ação cimentante fraca e temporária. O acúmulo de sílica amorfa no solo já é ligado a formação de horizontes duripã e a formação dos solos hardsetting devido a essa atuação cimentante (SCHALLER *et al.*, 2021).

O silício é encontrado em quase todos os materiais parentais, sendo um dos elementos mais básicos do solo, podendo ser encontrado na forma de minerais primários, herdados do material de origem do solo, na forma de minerais secundários e em fases mal ordenadas, a sílica liberada a partir da intemperização desses materiais pode precipitar nas superfícies dos minerais formando silicatos amorfos (SOMMER *et al.*, 2006).

O material amorfo é uma forma não cristalina e mal definida que representa um estado de transição entre o material originário, não intemperizado, e os minerais secundários bem cristalizados (JOHAS *et al.*, 1997). A principal forma de material inorgânico amorfo que ocorre no solo é a de óxido, ou, mais especificamente, óxidos hidratados de ferro, de alumínio e de sílica, separadamente ou combinados (SANTANA; MOURA FILHO, 1978).

4.2 Sensoriamento Próximo

O termo sensoriamento próximo se refere à detecção de informações sobre um objeto em uma curta distância; em campo ou em laboratório, essa informação é transferida do objeto ao sensor através da energia eletromagnética (DEMATTE, 2015).

A energia eletromagnética interage com todos os objetos, geralmente denominados como alvos, inclusive com o solo, podendo ser fracionada em três partes: absorvida, transmitida e refletida. O número de fracionamentos depende das propriedades físico-químicas e biológicas de cada objeto. A quantidade absorvida depende da intensidade da radiação, que, por sua vez, está relacionada com a faixa do espectro eletromagnético (MOREIRA, 2011).

O espectro eletromagnético representa a distribuição da radiação eletromagnética em regiões segundo o comprimento de onda e a frequência, abrangendo desde comprimentos de ondas curtas e de alta frequência, como os raios gama, até longos comprimentos de onda com baixa frequência, como as ondas de rádio. Na região do espectro visível, o olho humano consegue enxergar a energia eletromagnética, sendo capaz de distinguir as cores do violeta ao vermelho (FLORENZANO, 2011).

Todos os alvos da superfície terrestre, absorvem uma porção específica do espectro eletromagnético, caracterizando o comportamento espectral dos alvos chamado de “assinatura espectral”, ou seja, um valor específico de reflectância dentro do espectro eletromagnético. Assim, conhecendo qual comprimento de onda é absorvido por um determinado alvo e qual a intensidade de sua reflectância é possível obter interpretações acuradas de uma determinada cena orbital (PACHECO; FREIRE; BORGES, 2006).

Os sensores são responsáveis pela conversão da energia proveniente dos objetos em imagem ou gráfico, dependendo do tipo de sensor utilizado, o que permite associar a distribuição da radiância, emitância, ou retroespalhamento com suas propriedades físicas, químicas e biológicas (NOVO, 2010).

Os sistemas sensores podem ser classificados em sistemas imageadores, quando fornecem imagens da área observada, podendo ser citados como exemplos os scanners e as câmeras fotográficas. Por sua vez, os sistemas não imageadores são os que fornecem os dados em formato numérico ou na forma de gráficos, tendo como exemplo os radiômetros ou espectrorradiômetros (FORMAGGIO; SANCHES, 2017). No caso do espectrorradiômetro, o sensor privilegia a informação espectral, permitindo que se adquira as informações de energia

refletida em cada comprimento de onda ao longo de um espectro contínuo, sendo a saída dos dados em forma de gráfico (NOVO, 2010).

No Sensoriamento Próximo equipamentos portáteis vêm sendo utilizados visando a obtenção de dados de solo e planta, possibilitando diagnósticos em tempo real. Uma das técnicas de sensoriamento próximo de solo mais estudadas é a reflectância espectral (EITELWEIN, 2017).

4.2.1 Espectroscopia de Reflectância

A espectroscopia pode ser entendida como o estudo da dinâmica e da estrutura molecular através da análise dos espectros de absorção, espalhamento e emissão de radiação pelos diferentes tipos de materiais, ou seja, através da espectroscopia podem ser discriminados diferentes componentes da matéria a partir da análise dos espectros resultados de sua interação com a energia incidente (NOVO, 2001).

A espectroscopia de reflectância, por sua vez, é uma técnica que tem a função de medir, em diferentes comprimentos de onda, a energia eletromagnética refletida da superfície dos objetos (DEMATTE; TERRA, 2014).

A energia refletida pelas superfícies pode ser entendida como a porção de energia incidente, suprimindo-se as porções que foram absorvidas ou transmitidas. A reflectância espectral, que é função do comprimento de onda, pode ser definida matematicamente como a razão entre a energia no comprimento de onda refletida pelo objeto e a energia no comprimento de onda incidente sobre o objeto (EMBRAPA, 2000).

Por ser uma propriedade do alvo, a reflectância não pode ser medida por aparelhos comuns, sendo necessário o uso de um artifício matemático conhecido como "fator de reflectância espectral bidirecional" representado pela razão entre a radiação espectral refletida pela superfície do alvo e a radiação espectral refletida pelo material de referência (DEMATTE, 2002). O material de referência pode ser considerado como uma superfície quase perfeitamente difusora, desta forma, para fins de comparação de dados provenientes de origens diversas, é importante a utilização deste fator que é o parâmetro radiométrico mais conhecido e empregado em estudos de comportamento espectral de alvos (EIPHANIO *et al.*, 1992).

As feições espectrais ou bandas de absorção encontradas nos espectros de reflectância, são governadas por dois processos gerais: eletrônicos e vibracionais. A absorção de fótons em um comprimento de onda específico é a causa da mudança de um estado de

energia mais baixo para um mais alto; o movimento inverso ocorre quando há a emissão de um fóton, essas transições entre os níveis são responsáveis pelas feições nos espectros (EMBRAPA, 2000).

Nas curvas espectrais, ou assinaturas espectrais, o eixo x apresenta os comprimentos de onda e o eixo y o fator de refletância, que pode ser representado em porcentagem ou em fração. Assim, para cada amostra de solo pode-se ter uma assinatura ou curva espectral, que é uma propriedade cumulativa derivada de suas características heterogêneas intrínsecas, como mineralogia, materiais orgânicos, distribuição de partículas e química que constituem o solo (DEMATTE, 2002).

O uso da espectroscopia de reflectância nas análises de solos permite a obtenção de parâmetros químicos, físicos e biológicos de forma rápida e simultânea (VISCARRA ROSSEL *et al.*, 2016). As bandas de absorção, ou seja, picos e depressões, observadas na faixa do visível e infravermelho próximo podem ser usadas para determinar atributos do solo, incluído sua mineralogia (FANG *et al.*, 2018). Essa técnica, que vem sendo usada como alternativa ao método tradicional de análise de solos, dispensa o uso de reagentes químicos potencialmente perigosos para o meio ambiente, requer uma menor quantidade de pré-tratamento das amostras e não as inviabiliza após o uso (VISCARRA ROSSEL *et al.*, 2008).

4.2.2 Comportamento Espectral do solo

As faixas espectrais comumente usadas para estudar o padrão espectral de solos correspondem aos comprimentos de onda do visível (350 – 700 nm), infravermelho próximo (700 – 1000 nm), infravermelho de ondas curtas (1000 – 2500 nm) e infravermelho médio (2500 – 25000 nm) que podem ser obtidos por sensores em campo ou laboratório (DEMATTE, 2015).

A assinatura ou comportamento espectral do solo depende diretamente de sua composição química, física e mineral, sendo afetada principalmente pela matéria orgânica e óxidos de ferro; atributos como a mineralogia da fração argila, tamanho de partículas e umidade do solo, também são importantes neste processo (DALMOLIN *et al.*, 2005).

A matéria orgânica e a umidade do solo causam uma atenuação, de forma geral, na intensidade da reflectância do solo, devido a absorção da energia eletromagnética, exercendo um efeito de máscara e diminuindo as feições de absorção de outros constituintes do solo (RIZZO *et al.*, 2021).

As feições observadas no espectro do visível e infravermelho próximo (350 - 1000 nm) estão principalmente relacionadas às interações entre a radiação e os íons na estrutura cristalina dos óxidos de ferro (RIZZO *et al.*, 2021). A hematita, limonita e a goethita, constituintes de solos tropicais, apresentam bandas de absorção bem definidas próximas a 900nm (MOREIRA, 2011).

Minerais de argila do tipo 1:1 como a caulinita, e 2:1 como a esmectita e a vermiculita, importantes constituintes do solo, promovem o surgimento de feições de absorção nos comprimentos de onda de 1400 a 1900 nm devido a vibrações causadas pela interação de energia do grupo OH^- e da água (DEMATTE; TERRA, 2014). Feições na região de 2200 nm também estão relacionadas aos minerais de argila, principalmente a caulinita (COBLINSKI *et al.*, 2021).

Com o aumento da umidade do solo, a tendência é que a reflectância do solo decresça na região do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, quando comparada ao seu estado seco, pois, a absorção da radiação eletromagnética aumenta devido a presença da água (MULLER; DÉCAMPS, 2001). O efeito da umidade é claramente mais forte no infravermelho próximo do que o visível, e grandes diferenças espectrais podem ser observadas em bandas de absorção perto de 1450 e 1900 nm (GE *et al.*, 2014).

A textura do solo influencia a intensidade de reflectância ao longo do espectro, principalmente a região do infravermelho próximo. Solos com maior quantidade de argila apresentam maior superfície específica causando reflexão entre as superfícies e dificultando o escape da luz (EITELWEIN, 2017). Solos mais arenosos apresentam maior reflectância, principalmente pela presença do quartzo (DALMOLIN *et al.*, 2005), que apresenta alta reflectância, além de serem solos com menores teores de matéria orgânica (DEMATTE *et al.*, 2003).

Solos afetados por sais, com incrustações de sal na superfície, são, geralmente, mais lisos do que superfícies não salinas e causam alta refletância nas bandas do visível e do infravermelho próximo. Além disso a maioria dos solos afetados pelo sal pode ser identificada por uma crosta branca que se forma na superfície do solo, o que tende a aumentar a refletância espectral (ASFAW; SURYABHAGAVAN; ARGAW, 2018).

A rigor, a quantidade de energia refletida por determinado tipo de solo é função de todos esses fatores que, conjuntamente, se encontram no solo. Em determinadas condições, a influência de um parâmetro na energia refletida pelo solo sobrepuja a dos outros, resultando num espectro característico daquele parâmetro (MOREIRA, 2011).

4.2.3 Biblioteca Espectral

Para utilizar com sucesso a espectroscopia de reflectância na análise de solo é fundamental a criação de um banco de dados espectral ou biblioteca espectral (VISCARRA ROSSEL *et al.*, 2008). Um conjunto de dados abrangendo diferentes tipos de solos com variações nos seus compostos orgânicos e inorgânicos é necessário para que a espectroscopia possa ser aplicada amplamente e de forma comercial (DUNN *et al.*, 2002).

Bibliotecas espectrais contêm os dados espectrais e os resultados correspondentes obtidos pela análise convencional do solo. Para a criação de modelos de estimativas de atributos confiáveis é necessário que o solo em questão esteja representado em uma biblioteca espectral; portanto, é imprescindível a construção de bibliotecas representativas da região de interesse (NOCITA *et al.*, 2015).

De acordo com Viscarra Rossel *et al.* (2008), três importantes requisitos para a criação de uma biblioteca espectral são: possuir a quantidade de amostras suficiente para caracterizar a região onde ela será utilizada; essas amostras devem ser cuidadosamente preparadas, subamostradas, armazenadas e escaneadas; e, por fim os dados de análise de solo usados como referência devem ser adquiridos por meio de procedimentos confiáveis e credenciados.

Em 2008, pesquisadores de oito países representando a África, Ásia, Austrália Europa, América do Norte e América do Sul, iniciaram o desenvolvimento de uma biblioteca espectral global de solos usando dados espectrais na faixa do visível e infravermelho próximo, com o objetivo de avançar na pesquisa, estimular o desenvolvimento de novas aplicações e a adoção da espectroscopia na ciência do solo, entre outros. As informações disponibilizadas podem ser utilizadas para caracterizar o solo e sua variabilidade globalmente, e descrever as associações entre espectros, solo, cobertura do solo e geografia, além de mostrar a utilidade do banco de dados global para prever os atributos do solo (VISCARRA ROSSEL *et al.*, 2016).

Formaggio *et al.* (1996) já apontavam para a importância do levantamento, catalogação, experimentação e formação de bibliotecas espectrais de referência e para o estudo do comportamento espectral dos principais solos brasileiros, constituindo subsídios necessários às atividades de sensoriamento remoto atuais e vindouras, no país e nas regiões tropicais em geral.

Iniciativas para criação de uma biblioteca espectral de solos já foram registradas, Bellinaso *et al.* (2010) usando amostras de algumas regiões agrícolas do país, construíram

uma biblioteca espectral para aplicação na identificação das classes de solo. Demattê *et al.* (2019) apresentaram a primeira biblioteca espectral de solos integrada, formada com amostras de solos de todos os Estados da federação, permitindo relacionar os dados espectrais com variáveis ambientais e geográficas.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

No total foram utilizadas 14 amostras de horizontes com e sem o caráter coeso, referentes aos estados do Maranhão, Ceará, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia (Figura 2). No Ceará as coletas foram realizadas em dois pontos distintos, e em cada local foram analisados dois horizontes, com e sem o caráter coeso (sendo um subjacente ao outro).

Figura 2 - Locais de coleta dos solos estudados.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os municípios onde ocorreram as coletas, com as classificações de solo das respectivas amostras, além dos horizontes com e sem o caráter coeso estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Locais das coletas, tipos de solo e identificação dos horizontes.

Local	Solo	Horizontes		Profundidade (cm)	
		CCC	SCC	Coeso	Não Coeso
Brejo/MA	Argissolo Amarelo	AB	Bt1	43-60	60-100
Fortaleza/CE1*	Argissolo Amarelo	Bt2	Bt1	79-112	63-79
Fortaleza/CE2*	Argissolo Vermelho-Amarelo	Bt1	BE	96-145	62-96
Goiana/PE	Argissolo Amarelo	Bt	Bw	43-70	135-190
Rio Largo/AL	Latossolo Amarelo	BA	Bw2	35-60	115-170
Neópolis/SE	Argissolo Amarelo	Bt1	Bt3	25-50	95-160
Cruz das Almas/BA	Argissolo Amarelo	Bt1	Bt2	114-148	148-190

CCC – Com caráter coeso; SCC – Sem caráter coeso.

As siglas CE1 e CE2 usadas para diferenciar os dois locais de coleta em Fortaleza.

Fonte: elaborada pela autora.

Todos os solos foram previamente classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018). O descritivo morfológico referente aos horizontes com caráter coeso é apresentado na Tabela 2.

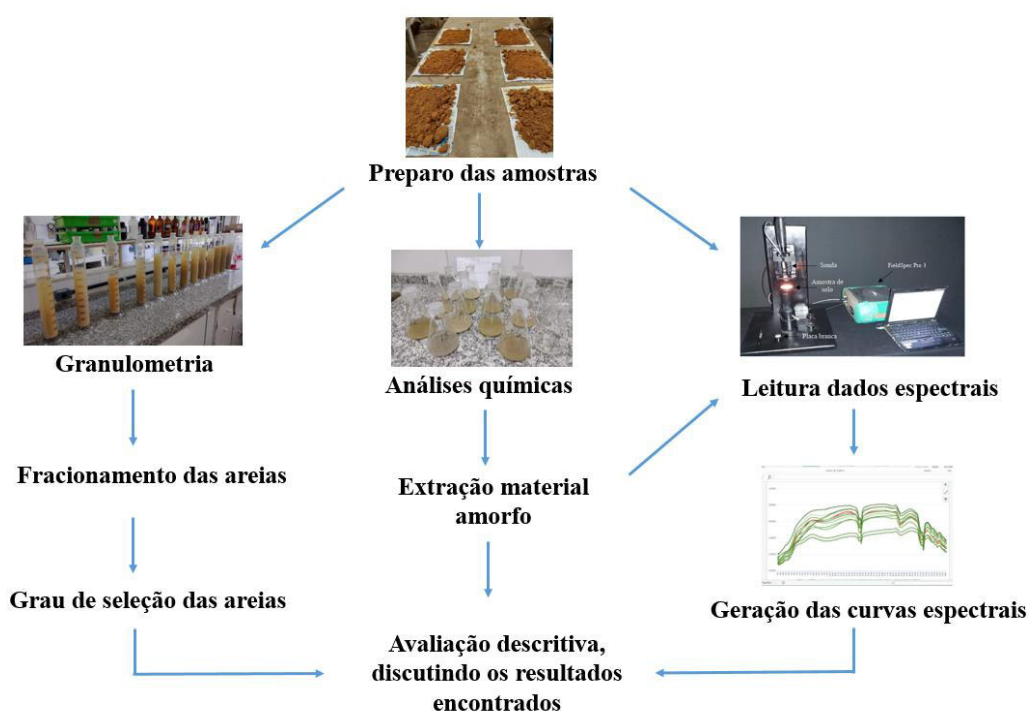
Tabela 2 – Descrição morfológica dos horizontes com caráter coeso nos solos estudados.

Local	Solo	Hor.	Descrição
Brejo/MA	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso plintossólico ¹	AB	43-60 cm, bruno (10YR 5/3, úmido) e cinzentobrunado-claro (10YR 6/2, seco), mosqueado ocasional (raro), pequeno e médio, distinto, brunoavermelhado-claro (5YR 6/4); maciça e fraca pequena e média blocos subangulares e angulares; muito dura a extremamente dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
Fortaleza/CE1	ARGISSOLO AMARELO Eutrocoeso típico ²	Bt2	79-112 cm; bruno forte (7,5 YR 5/6 úmido), amarelo-avermelhado (7,5 YR 6/6 seco); maciça com tendência a formação de blocos subangulares; extremamente dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.
Fortaleza/CE2	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico ²	Bt1	96-145cm; vermelho- amarelado (5YR 5/8 úmido), amarelo avermelhado (5 YR 6/8 seco); maciça com tendência a formação de blocos subangulares; extremamente duro, friável a firme, plástica e pegajosa; transição irregular e gradual.
Goiana/PE	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso epiáquico ³	Bt	43-70 cm; bruno amarelado-claro (10YR 6/4, seco); maciça em partes, fraca pequena e média blocos subangulares; muito duro, friável com partes firmes, plástica e pegajosa, transição plana e gradual.
Rio Largo/AL	LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso argissólico ⁴	BA	35-60 cm; bruno-amarelado (10YR 5/6, úmido); mosqueado pouco, pequeno a médio e difuso bruno forte (7,5YR 5/6, seco); fraca pequena a média bloco angular a subangular e parte maciça; friável a firme, plástico e pegajoso; transição plana e gradual
Neópolis/SE	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso Abrúptico ⁴	Bt1	25-50 cm; bruno-forte (7,5YR 5/6, úmido), amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, seco); fraca pequena e média blocos angulares e subangulares e partes maciças; muito duro a extremamente duro, friável, plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
Cruz das Almas/BA	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso Típico ⁵	Bt1	114-148 cm; bruno amarelado escuro (10YR 4/4, úmido) e bruno amarelado (10YR 5/4, seco); fraca pequena e média blocos subangulares e partes maciças; duro a muito duro, friável, plástico e pegajoso, transição plana e difusa.

1 - Silva *et al.* (2020); 2 - Vieira (2012); 3 - Araújo Filho *et al.* (2014); 4 - Araújo Filho e Lopes (2019); 5 - Melo Filho e Araújo Filho (1996), Costa e Lima (2019).

Os solos foram secos ao ar, destorroados e peneirados (malha da peneira com abertura de 2 mm). Em seguida, foram realizadas análises químicas e físicas para a caracterização dos horizontes com e sem o caráter coeso, também foram feitas leituras espectrais antes e depois da extração do material amorfo, conforme esquema abaixo (Figura 3).

Figura 3: Fluxograma representativo da metodologia utilizada.



Fonte: Elaborada pela autora.

5.1 Granulometria

A análise granulométrica foi executada no laboratório de Pedologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), utilizando-se o tamisamento para a separação da fração areia após uso do hidróxido de sódio (NaOH) como dispersante e agitação rápida por 10 minutos. O método da pipeta (CAMARGO *et al.*, 2009) foi utilizado para a quantificação de argila e o silte foi determinado pela diferença entre o total da amostra (terra fina seca ao ar) e o somatório de areia e argila (EMBRAPA, 2017).

5.2 Fracionamento da areia

O fracionamento da areia foi realizado em cinco classes de tamanho (Tabela 3), de acordo com a classificação granulométrica do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – USDA.

Os dados da distribuição granulométrica da fração areia foram trabalhados estatisticamente por meio do programa PHI (Programa de microcomputador para análise estatística da granulometria), desenvolvido por Jong van Lier e Vidal - Torrado (1992), o qual faz uso de padrões estatísticos de Folk e Ward (1957). No programa PHI, os dados de entradas correspondem às porcentagens absolutas de cada fração granulométrica na amostra e seu correspondente diâmetro na escala phi [$\phi = -\log_2 D(\text{mm})$]. Com a transformação dos diâmetros das classes em mm para a escala phi, tem-se os valores demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição da fração areia com a correspondência na escala ϕ .

Fração	Diâmetro (mm)	Escala ϕ
Muito Grossa	≤ 2 a > 1	≤ -1 a > 0
Grossa	≤ 1 a $> 0,5$	≤ 0 a > 1
Média	$\leq 0,5$ a $> 0,25$	≤ 1 a > 2
Fina	$\leq 0,25$ a $> 0,105$	≤ 2 a $> 3,32$
Muito Fina	$\leq 0,105$ a $> 0,053$	$\leq 3,32$ a $4,32$

Fonte: Jong van Lier e Vidal - Torrado (1992).

5.3 Análises Químicas

As análises químicas das amostras coletadas foram realizadas no laboratório de Pedologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foram determinados, de acordo com a metodologia descrita pela Embrapa (1997): pH em água destilada e cloreto de potássio (KCl) 1N, imergindo eletrodo em suspensão solo/líquido na proporção de 1:2,5; alumínio trocável, por meio da extração com solução de KCl 1N e determinação volumétrica com indicador azul de bromotimol e 0,025N de hidróxido de sódio (NaOH); acidez potencial (H^+ e Al^{3+}), por meio da extração com acetato de cálcio 1 N e determinação volumétrica com solução de NaOH 0,025N em presença de fenolftaleína como indicador; cálcio e magnésio foram determinados por espectrometria de absorção atômica após extração acetato de amônio a pH 7,0; sódio e potássio foram determinados espectrofotometria de chama, também após

extração com acetato de amônio a pH 7,0, por fim o fósforo foi extraído com solução Mehlich – 1 e determinado usando espectrofotometria. Com os resultados obtidos foi possível calcular a capacidade de troca de cátions (CTC) e a saturação por bases (V%) para cada horizonte.

O teor de carbono orgânico foi obtido pelo método da oxidação por via úmida, utilizando dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido como agente oxidante e uma fonte externa de calor. A titulação do dicromato foi realizada com solução de sulfato ferroso amoniacal (sal de mor – $Fe (NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) tendo como indicador o ferroin (MENDONÇA; MATOS, 2005).

5.3.1 Extração do material amorfo

Para extração dos compostos amorfos de silício, ferro, alumínio foi pesado 1g de solo de cada horizonte em tubo falcon de 50ml e adicionados 40 ml do reagente Tamm (oxalato de amônio ácido) (McKEAGUE; DAY, 1966). Os tubos foram então envoltos em papel alumínio, de modo a deixar a solução sem nenhuma exposição à luz e colocados para agitar horizontalmente por quatro horas, a 120 rpm. Após agitação o material foi centrifugado a 2.000 rpm durante dez minutos; o sobrenadante foi filtrado (papel filtro quantitativo faixa azul) e analisado usando espectrômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP – OES) para obter os valores de silício e alumínio e o espectrofotômetro de absorção atômica para os valores de ferro (EMBRAPA, 2017).

O solo presente no tubo, após a retirada do sobrenadante, foi transferido para latas de alumínio usando uma pisseta com água destilada e colocado em estufa a 45 °C até atingirem massa constante. Foram utilizados 42 tubos contendo 1 g de solo de cada horizonte analisado, de forma a obter por volta de 30 g de solo, o suficiente para leitura espectral.

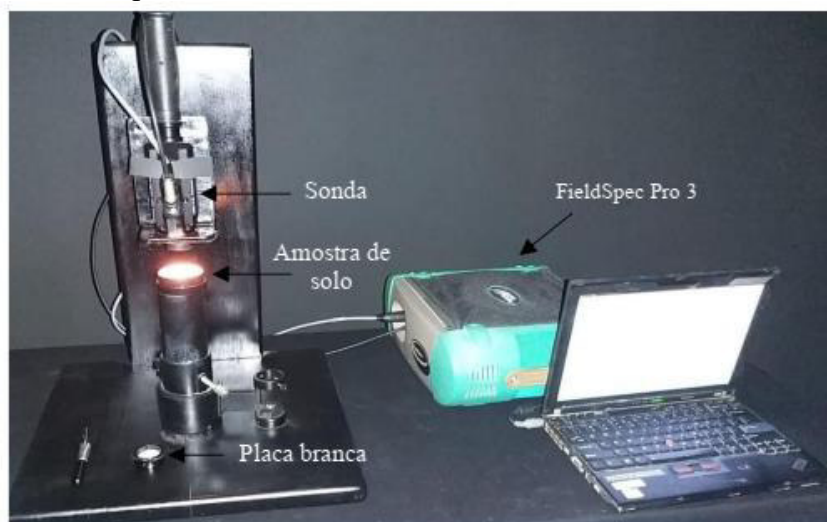
A solução do reagente Tamm foi obtida dissolvendo 16,5g de oxalato de amônio ($((COONH_4)_2, H_2O_3)$) e 10,90g de ácido oxálico ($((COOH)_2, 2H_2O_4)$) em aproximadamente 900ml de água destilada. Ajustou-se o pH para 3,0 adicionando ácido oxálico a 0,2 M ou hidróxido de amônio a 10%. Depois a solução foi aferida para 1000ml em balão volumétrico obtendo uma concentração de 0,2 M, o pH deve ser ajustado para (PANSU; GAUTHEYROU, 2006).

5.4 Dados Espectrais

A coleta de dados espectrais das amostras de solos foi realizada em sala escura, utilizando-se o espectrorradiômetro FieldSpec Pro FR 3 (Analytical Spectral Devices, Boulder, Colorado, USA), pertencente ao Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará. O sensor hiperspectral utilizado recobre a faixa espectral entre 350 e 2500 nm com resolução espectral de 1 nm entre 350 e 1100 nm e de 2 nm entre 1100 e 2500 nm. As faixas espectrais são correspondentes ao visível (VIS = 300 a 700 nm), infravermelho próximo (NIR = 700 a 1000 nm) e infravermelho de ondas curtas (SWIR= 1000 a 2500 nm).

Para realização das leituras as amostras previamente destorroadas, peneiradas (malha de abertura 2 mm) e secas em estufa a 45 °C por um período de 24 horas, para homogeneização dos efeitos da umidade e rugosidade (EPIPHANIO *et al.*, 1992), foram acondicionadas em recipiente de 5 cm de diâmetro, formando uma camada com espessura de aproximadamente 1,5 cm para leitura no aparelho com sonda de contato acoplada a suporte (Figura 4), da mesma forma foi feito para as amostras após a extração do material amorfo.

Figura 4: Geometria da aquisição de dados espectrais com leitura de sonda por contato.



Fonte: Ribeiro, S. G. (2021).

Foi utilizada uma placa branca como padrão de referência para calibração do sensor, através de pré-leitura, considerada como padrão de 100% de reflectância (Spectralon). Foram realizadas três leituras em pontos diferentes da superfície das amostras, sendo cada

leitura a média de 10 repetições, e calculado o valor médio das três leituras. Com esses dados, utilizando o Microsoft Excel, foram geradas as curvas espectrais.

Para a realização da avaliação descritiva das curvas espectrais, foi observada tanto a forma geral da curva espectral de cada amostra ao longo do espectro eletromagnético, quanto sua intensidade de reflectância, atentando-se ainda para as feições de absorção existentes (DEMATTÊ, 2002). Nessa avaliação também são discutidos os resultados encontrados nas análises químicas e físicas (FORMAGGIO *et al.*, 1996; MENESES *et al.*, 2019). Para realçar os picos de absorção a fim de localizar e identificar as principais feições foi aplicada a primeira derivada, obtida pela equação, a seguir (RUDORFF, 2006):

$$\left. \frac{ds}{d\lambda} \right|_n \approx \frac{\rho(\lambda_{n+1}) - \rho(\lambda_{n-1})}{2\Delta\lambda}$$

Onde, $\Delta\lambda$ representa a separação entre bandas adjacentes; $\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i$, para $\lambda_j > \lambda_i$, com o intervalo entre as bandas constante; $\rho(\lambda_n)$ representa o valor do espectro na faixa de comprimento de onda λ_n .

Para identificar amostras com base espectral semelhantes, foi aplicada a análise de agrupamento utilizando o “*single linkage*” como método de distância entre os *clusters* por meio do software Statistical Analysis System (SAS), University version (SAS, Institute Inc., Cary, NC, USA, 2012–2018), também foi aplicada a análise de componente principal (ACP) usando o R 4.3.1 (R Core Team, 2023).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Granulometria e Fracionamento da Areia

A tabela 4 apresenta a análise granulométrica dos solos estudados, pode-se observar que a fração areia foi predominante mesmo sendo horizontes de subsuperfície.

Tabela 4 – Valores de argila, silte, areia e a classificação textural.

Local	Horizonte – CCC	Porcentagem (%)			Classe Textural
	Horizonte - SCC	Argila	Silte	Areia	
MA	AB	27,1	6,6	66,2	Franco argiloarenosa
MA	Bt1	34,5	6,7	58,9	Franco argiloarenosa
CE1	Bt1	33,9	6,9	59,2	Franco argiloarenosa
CE1	BE	30,0	12,8	57,3	Franco argiloarenosa
CE2	Bt2	35,2	8,3	56,5	Argiloarenosa
CE2	Bt1	26,6	8,5	65,0	Franco argiloarenosa
PE	Bt	30,7	4,1	65,3	Franco argiloarenosa
PE	Bw	30,4	8,4	61,2	Franco argiloarenosa
AL	BA	46,9	4,5	48,6	Argiloarenosa
AL	Bw2	56,2	7,6	36,2	Argila
SE	Bt1	24,8	9,2	65,9	Franco argiloarenosa
SE	Bt3	28,1	8,9	63,0	Franco argiloarenosa
BA	Bt1	53,9	4,6	41,5	Argila
BA	Bt2	50,4	6,7	42,9	Argila

CCC – Com caráter coeso; SCC – Sem caráter coeso.

Fonte: Elaborada pela autora.

Os horizontes com e sem o caráter coeso apresentaram principalmente a classificação textural franco argiloarenosa. Apenas para o solo do estado da Bahia a argila foi predominante nos dois horizontes. Silva (2019), de forma semelhante, observou o predomínio da areia e da classe textural franco argiloarenosa para horizontes com e sem o caráter coeso estudados.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) associa o caráter coeso a horizontes com textura média, argilosa e muito argilosa. Silva (2019) constatou em seu trabalho que, mesmo com diferenças significativas nos teores da fração areia dos horizontes com e sem o caráter coeso, eles não diferiram quanto à classe textural, Araújo *et al.* (2018) também constataram diferenças significativas na fração areia, mas sem identificar um padrão de maior quantidade dessa fração nos horizontes com caráter coeso.

Quanto ao fracionamento das areias, houve o predomínio de areia média seguida de areia fina, tanto para os horizontes com caráter coeso quanto para sem os sem o referido atributo, diferindo apenas para o solo do Maranhão - no horizonte sem caráter coeso houve predomínio da areia fina - e para o ponto CE2 com caráter coeso a areia média foi seguida da areia grossa (Tabela 5).

Tabela 5 – Fracionamento e Grau de seleção das areias de acordo com os parâmetros de Folk e Ward (1957).

Local	Hor CCC	Fracionamento areia (%)					Média Gráfica	Desvio Padrão	Grau de Seleção das Areias
	Hor SCC	Muito grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina			
MA	AB	01,54	09,96	44,02	41,62	02,93	1,910	0,772	MS
MA	Bt1	02,54	12,35	26,27	51,84	05,52	2,034	0,941	MS
CE1	Bt1	03,51	09,41	64,33	15,06	01,97	1,559	0,670	MBS
CE1	BE	04,23	11,55	61,29	14,29	02,29	1,515	0,719	MS
CE2	Bt2	05,85	24,37	53,60	12,50	02,07	1,275	0,801	MS
CE2	Bt1	03,90	06,56	49,26	35,36	02,81	1,853	0,802	MS
PE	Bt	02,62	14,73	62,68	15,27	02,16	1,503	0,688	MBS
PE	Bw	03,29	14,91	59,23	18,04	01,89	1,521	0,721	MS
AL	BA	03,43	16,74	51,25	23,08	01,98	1,562	0,810	MS
AL	Bw2	03,91	18,55	42,40	28,03	04,32	1,644	0,924	MS
SE	Bt1	05,18	11,42	41,05	36,25	03,88	1,805	0,920	MS
SE	Bt2	05,18	15,62	58,88	14,18	03,19	1,451	0,788	MS
BA	Bt1	03,76	21,24	36,41	28,76	05,83	1,676	1,011	PS
BA	Bt2	04,94	25,26	35,25	28,08	04,47	1,568	1,014	PS

CCC – Com caráter coeso; SCC – Sem caráter coeso.

MBS – Moderadamente bem selecionado, MS – Moderadamente selecionada, PS – Pobremente selecionada.

Fonte: Elaborada pela autora.

Maiores teores de areia fina contribuem para o adensamento dos horizontes, pois possibilitam um ajustamento mais compacto das partículas, o que pode estar relacionado com a formação do caráter coeso do solo de Sergipe, mas não pode ser considerado fator determinante quando observada a proximidade das porcentagens de areia fina e muito fina entre horizontes com e sem o caráter coeso, sendo inclusive mais elevada para os horizontes sem o atributo em alguns locais.

De forma geral, em cada local estudado, os horizontes com e sem o caráter coeso apresentaram mesmo grau de seleção da areia, o moderadamente selecionado (Tabela 5); apenas na Bahia o grau de seleção chegou a pobremente selecionado, o que ocorreu nos dois horizontes. A areia má selecionada também contribui para o processo de adensamento do solo, devido ao empacotamento mais fechado das partículas e consequente redução da porosidade (ARAÚJO *et al.*, 2018). Porém, apesar de contribuir na formação de horizontes com caráter coeso não se trata de um processo determinante, tendo em vista que, Duarte (2015) e Silva (2019) também identificaram o mesmo grau de seleção da areia para horizontes com e sem caráter coeso.

6.2 Análises químicas

Os solos da região dos Tabuleiros Costeiros, além de alguns apresentarem o caráter coeso, possuem em geral carência de nutrientes, apresentam baixa fertilidade natural, CTC (Capacidade de Troca de Cátions) e saturação por bases (CRUZ *et al.*, 2017; SOUZA, 1996), o que condiz com os resultados apresentados na Tabela 6.

Nos horizontes com e sem caráter coeso foram observados valores de CTC, saturação por bases, soma de bases (cálcio, magnésio, sódio e potássio) e fósforo abaixo do ideal, apenas o perfil CE2 apresentou saturação por bases acima de 50%, porém ligada a valores de CTC baixos, indicando também baixa fertilidade.

Para todas as amostras, os valores de carbono orgânico total estão abaixo de 6 g kg⁻¹. Em Alagoas, no horizonte sem caráter coeso, o carbono orgânico total chegou a 7,08 g kg⁻¹, o que pode ser devido à maior ocorrência de argila e por se tratar de horizonte de transição (BA), estando mais próximo da superfície, e mantendo parte das características do horizonte A.

Tabela 6 – Resultado das análises químicas.

Local	Hor. Coeso	Cátions Trocáveis (cmol _c kg ⁻¹)								V ³ (%)	P (mg kg ⁻¹)	COT ⁴ (g kg ⁻¹)	pH	
	Hor. Não Coeso	Ca	Mg	K	Na	Al	H	SB ¹	CTC ²				H ₂ O	KCl
MA	AB	0,06	0,13	0,03	0,10	0,50	3,14	0,32	3,95	8,08	0,030	2,90	5,16	4,14
MA	Bt1	0,01	0,14	0,03	0,10	0,41	1,78	0,28	2,48	11,37	0,071	3,65	5,06	4,19
CE1	Bt1	0,50	0,67	0,08	0,13	0,27	1,92	1,38	3,58	38,65	0,043	3,00	4,95	4,08
CE1	BE	0,65	0,73	0,08	0,13	0,17	1,63	1,59	3,39	47,00	0,042	3,35	4,98	4,26
CE2	Bt2	1,05	0,42	0,23	0,12	0,04	0,96	1,82	2,82	64,59	0,180	2,95	6,14	5,38
CE2	Bt1	1,13	0,41	0,13	0,11	0,04	1,06	1,77	2,87	61,74	0,190	3,52	6,30	5,28
PE	Bt	0,26	0,15	0,04	0,11	0,58	2,97	0,57	4,12	13,77	0,044	4,59	4,78	4,05
PE	Bw	0,11	0,19	0,04	0,12	0,60	2,69	0,46	3,75	12,15	0,032	3,79	4,78	4,10
AL	BA	0,09	0,29	0,04	0,13	0,83	5,16	0,55	6,54	8,42	0,067	7,08	4,75	4,05
AL	Bw2	0,40	0,33	0,04	0,15	0,41	3,48	0,91	4,80	19,01	0,014	4,15	4,91	4,23
SE	Bt1	0,24	0,40	0,05	0,12	0,27	1,62	0,80	2,70	29,73	0,220	4,06	5,03	4,22
SE	Bt3	0,21	0,35	0,04	0,11	0,51	1,28	0,71	2,51	28,43	0,040	2,47	4,78	4,07
BA	Bt1	0,02	0,44	0,09	0,28	0,84	3,05	0,83	4,72	17,55	0,030	4,05	4,16	3,74
BA	Bt2	0,02	0,41	0,15	0,31	0,66	2,53	0,90	4,09	21,92	0,028	4,46	4,12	3,72

1 – SB: Soma de bases; 2 – CTC: Capacidade de troca de cátion; 3 – V: Saturação por bases; 4 – COT: Carbono orgânico total.

Fonte: Elaborada pela autora.

6.2.1 Extração do material amorfo

As formas de baixa cristalinidade de ferro, silício e alumínio extraídos com oxalato de amônio estão envolvidas com a formação de horizontes fragipãs (CORRÊA *et al.*, 2015) e de outros horizontes cimentados como ortsteins e duripãs (GOMES *et al.*, 2017). Vieira *et al.* (2012) estudando solos com caráter coeso dos Tabuleiros Costeiros, apontaram a importância da ação cimentante desses compostos na formação dos horizontes com o referido atributo.

De acordo com a Tabela 7, os teores de ferro, silício e alumínio associados a compostos de baixa cristalinidade foram baixos em todos os horizontes analisados, o que pode estar associado à baixa quantidade de matéria orgânica, baixa CTC e predominância da fração areia facilitando a perda desses elementos; porém, os valores encontrados nos horizontes com caráter coeso foram, em geral, maiores.

Tabela 7 – Teores de ferro, silício e alumínio de compostos amorfos extraídos dos horizontes estudados.

Local	Hor CCC Hor SCC	----- g kg ⁻¹ -----		
		Ferro (Fe)	Alumínio (Al)	Silício (Si)
MA	AB	0,8501	0,0090	0,0006
MA	Bt1	0,2184	0,0081	0,0006
CE1	Bt1	0,0759	0,0069	0,0042
CE1	BE	0,0872	0,0069	0,0019
CE2	Bt2	0,0958	0,0078	0,0030
CE2	Bt1	0,1509	0,0070	0,0011
PE	Bt	1,3529	0,0081	0,0014
PE	Bw	0,7662	0,0090	0,0011
AL	BA	1,6381	0,0098	0,0035
AL	Bw2	0,4230	0,0081	0,0031
SE	Bt1	0,1624	0,0062	0,0010
SE	Bt3	0,0462	0,0066	0,0002
BA	Bt1	0,0897	0,0079	0,0011
BA	Bt2	0,0729	0,0087	0,0008

CCC – Com caráter coeso; SCC – Sem caráter coeso.

Fonte: Elaborada pela autora.

Os valores de ferro advindo de compostos amorfos foram superiores aos encontrados para silício e alumínio. Araújo Filho (2003) observou maior ocorrência de ferro em composto de baixa cristalinidade em horizontes fragipãs quando comparados aos duripãs indicando competição desse elemento com o alumínio, restringindo a formação de aluminossilicatos amorfos.

A maior quantidade do alumínio em relação ao silício, como observado no Tabela 7, já foi retratada em outros trabalhos. Moreau (2001), extraindo material amorfo de solos dos Tabuleiros Costeiros, observou a predominância do alumínio e sua relevância na cimentação de horizontes fragipã e duripã, Vieira (2013) e (2019), Duarte (2015) e Silva (2019) também relataram maior presença desse elemento no material amorfo em horizontes com caráter coeso, reforçando que esse elemento também contribui no processo de cimentação desses horizontes.

Os teores de silício foram os menos expressivos, porém mais elevados nos horizontes com caráter coeso. Resultados semelhantes foram obtidos por Duarte (2015) e Vieira (2019), que também relataram baixos valores de silício associado a material amorfo, porém com incrementos mais significativos nos horizontes com caráter coeso, Vieira (2019) ainda relata maior ação cimentante do silício em relação ao alumínio em dois dos solos estudados.

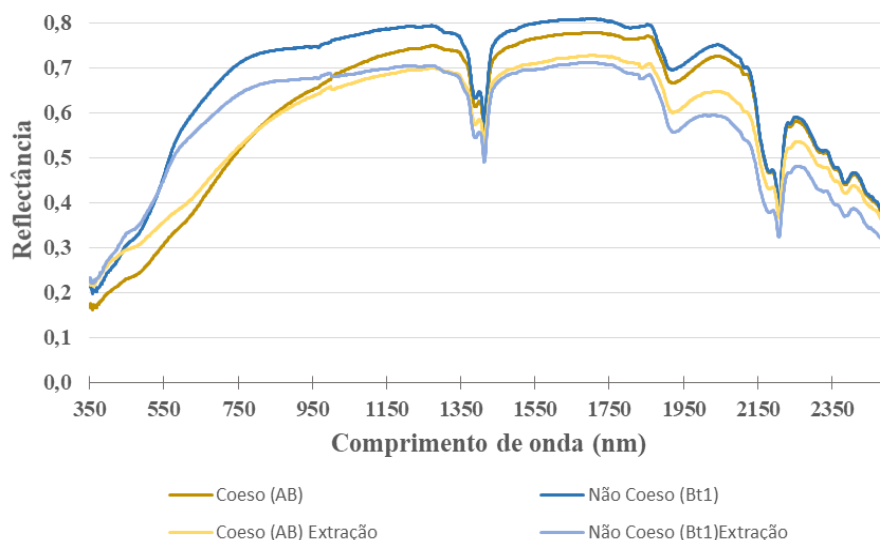
A sílica amorfa está associada a uma cimentação reversível que ocorre durante os períodos secos, quando ocorre a precipitação desses compostos (ARAÚJO FILHO, CARVALHO e SILVA, 2001) e, de acordo com os resultados encontrados, mesmo em pequenas quantidades, podem contribuir com a formação do caráter coeso.

6.3 Dados espectrais

Os dados espectrais de reflectância foram agrupados por estado com representações de forma gráfica (curvas) para cada um dos horizontes analisados com e sem o caráter coeso, antes e após a extração do material amorfo.

No Maranhão (Figura 5), as curvas dos horizontes com caráter coeso (AB) e sem caráter coeso (Bt1) apresentaram diferenças significativas apenas no início, até aproximadamente 1000 nm. As feições observadas na região do VIS – NIR (350 a 1000 nm) estão principalmente relacionadas a interações entre a radiação e os íons na estrutura cristalina dos óxidos de ferro (Rizzo *et al.*, 2021). O horizonte com caráter coeso (AB) foi descrito como cinzento-brunado-claro quando seco (Tabela 2), cores acinzentadas indicam perda de ferro, o que pode justificar a curva do horizonte AB seguir ascendente até aproximadamente 1000 nm sem apresentar as feições características da presença dos óxidos.

Figura 5 – Curvas espectrais dos horizontes com e sem o caráter coeso estudados no Maranhão antes e após extração do material amorfo.



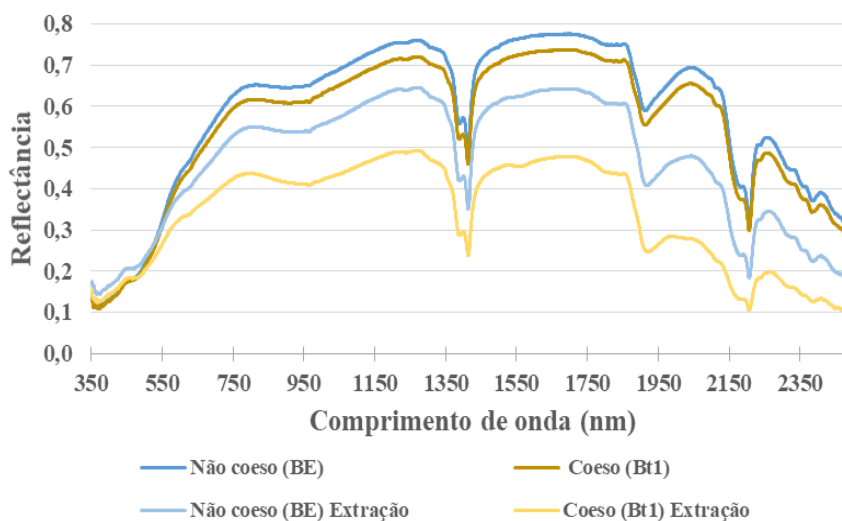
Fonte: Elaborada pela autora.

As quatro curvas espectrais do solo maranhense apresentaram feições de absorção significativas em 1400 e 1900 nm, que são atribuídas à vibração molecular dos grupos OH da água adsorvida aos argilominerais (DALMOLIN *et al.*, 2005); em 2200 nm, a feição é atribuída às vibrações moleculares dos grupos Al-OH tanto de minerais 1:1 quanto de 2:1, porém observa-se a presença de um “degrau” no formato da banda de absorção típica da caulinita (DEMATTÊ *et al.*, 2015). Nos solos dos Tabuleiros Costeiros, a fração argila é constituída predominantemente pela caulinita, tanto nos horizontes superficiais quanto em maiores profundidades (MOREAU *et al.*, 2006), o que condiz com os resultados encontrados.

Demattê *et al.* (2015) identificaram uma tendência de aumento da intensidade de reflectância em toda a extensão da curva com a extração do ferro associado a material amorfo, ao contrário do que foi observado no presente trabalho, onde após a extração houve redução da reflectância ao longo das curvas nos horizontes com e sem o caráter coeso, fato que se repete para os demais solos estudados, como será demonstrado em seguida.

No primeiro perfil cearense (CE1) (Figura 6), as curvas espectrais dos horizontes sem caráter coeso (BE) e com caráter coeso (Bt1) também mostraram feições semelhantes, além da alta reflectância, assim como observado no Maranhão, devido à pouca quantidade de matéria orgânica e maior porcentagem de areia.

Figura 6 – Curvas espectrais dos horizontes com e sem o caráter coeso estudados no Ceará (CE1) antes e após extração do material amorfo.



Fonte: Elaborada pela autora.

As mesmas feições permanecem após a extração do material amorfo, sendo a principal diferença a intensidade de reflectância, pois o horizonte com (Bt1) e sem o caráter coeso (BE) sofreram significativa redução nos índices de reflectância. Como já mencionado, Demattê *et al.* (2015) observaram que os óxidos de ferro de baixa cristalinidade influenciaram a intensidade da reflectância em toda a extensão da curva, mas sua remoção não alterou as feições características nas regiões de 480 e 850 nm, indicando que é o ferro associado a material mais cristalino o responsável por essas feições, o que é corroborado neste trabalho, pois, mesmo sendo o Fe o principal elemento dos compostos amorfos extraídos, as feições referentes aos óxidos de ferro não foram alteradas. Isso pode indicar também que os elementos amorfos contendo Si e Al também estejam mais relacionados à intensidade de reflectância do que feições específicas.

Outro fator que pode estar ligado ao rebaixamento das curvas após a extração, que se repete nos solos estudados, é a rugosidade do material analisado. Mesmo após o peneiramento do solo, ele ainda apresentava certa granulosidade (Figura 7), o que interfere na reflectância, tanto pelo efeito do espalhamento quanto do sombreamento (MOREIRA, 2011); embora sua forma seja bastante semelhante, a reflectância é em geral menor.

Como mostra a Figura 7, após ser retirado da estufa na última etapa da extração, o solo apresenta a formação de pequenas placas, que, após leve maceração e peneiramento podem ainda afetar a rugosidade da amostra.

Figura 7 – Solo ao ser retirado da estufa e após o peneiramento.



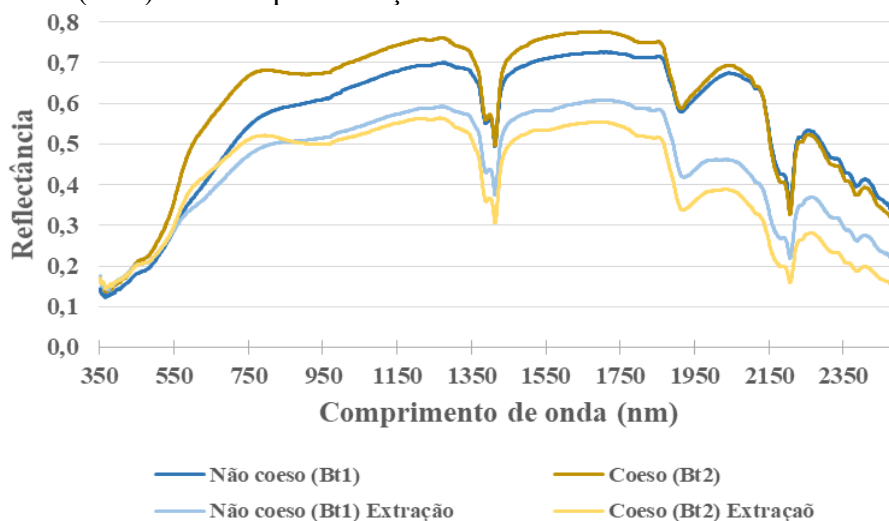
Fonte: Elaborada pela autora.

Nas quatro curvas pode-se observar feições concentradas em torno de 480 nm e 920 nm indicando a presença da goethita, importante óxido de ferro encontrado em solos intemperizados de regiões tropicais (COBLINSKI *et al.*, 2021). Assim como no Maranhão, as feições de absorção em 1400 e 1900 nm são bastante significativas; também em 2200 nm fica destacada a banda de absorção ligada à presença da caulinita.

No segundo perfil cearense (CE2) (Figura 8), o horizonte sem caráter coeso (Bt1), mesmo com maior conteúdo de areia, apresentou intensidade de reflexão menor que o horizonte com caráter coeso (Figura 8), o que pode estar relacionado ao conteúdo um pouco maior de carbono orgânico total (Tabela 6), pois a presença de matéria orgânica causa atenuação geral na intensidade de reflectância do solo, devido à absorção de energia eletromagnética em toda a faixa espectral (RIZZO *et al.*, 2021).

O horizonte com caráter coeso (Bt2) apresentou maior abaulamento em 920 nm, indicando maior presença de óxidos quando comparado ao horizonte sem caráter coeso. As demais feições das curvas também se assemelham às avaliadas anteriormente, indicando a presença de óxidos de ferro, do grupo OH e da caulinita. Também é possível perceber a redução na reflectância após extração do material amorfo.

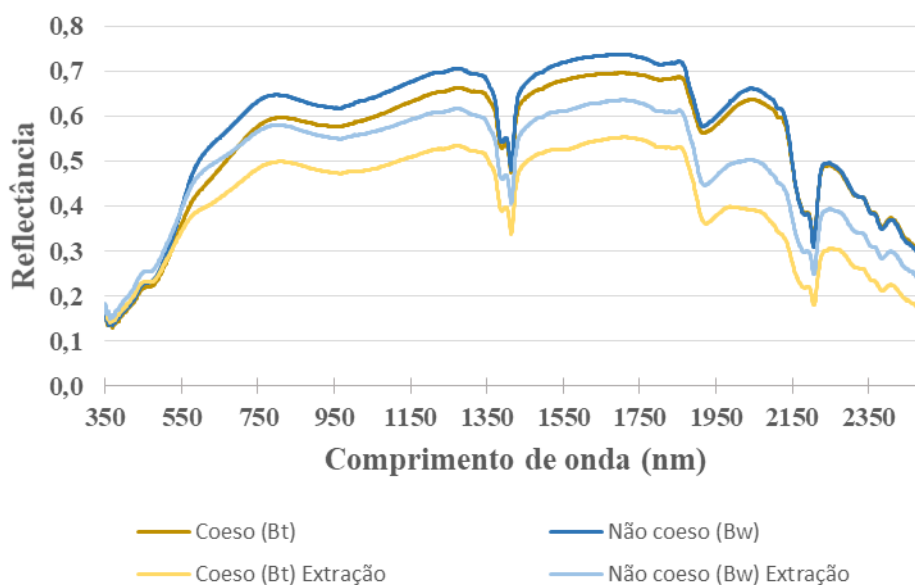
Figura 8 – Curvas espectrais dos horizontes com e sem o caráter coeso estudados no segundo perfil do Ceará (CE2) antes e após extração do material amorfo.



Fonte: Elaborada pela autora.

Em Pernambuco (Figura 9), os horizontes com (Bt) e sem caráter coeso (Bw) apresentaram curvas semelhantes, diferindo quanto à intensidade de reflectância; o horizonte Bt apresentou reflectância ligeiramente menor, o que pode ser devido à maior quantidade de matéria orgânica. Também é possível notar a presença das feições referentes aos óxidos de forma mais acentuada pelo maior abaulamento da curva, do grupo OH e da caulinita, em aproximadamente 900, 1400 e 1900 e 2200 nm respectivamente.

Figura 9 – Curvas espectrais dos horizontes com e sem o caráter coeso estudados em Pernambuco antes e após extração do material amorfo.

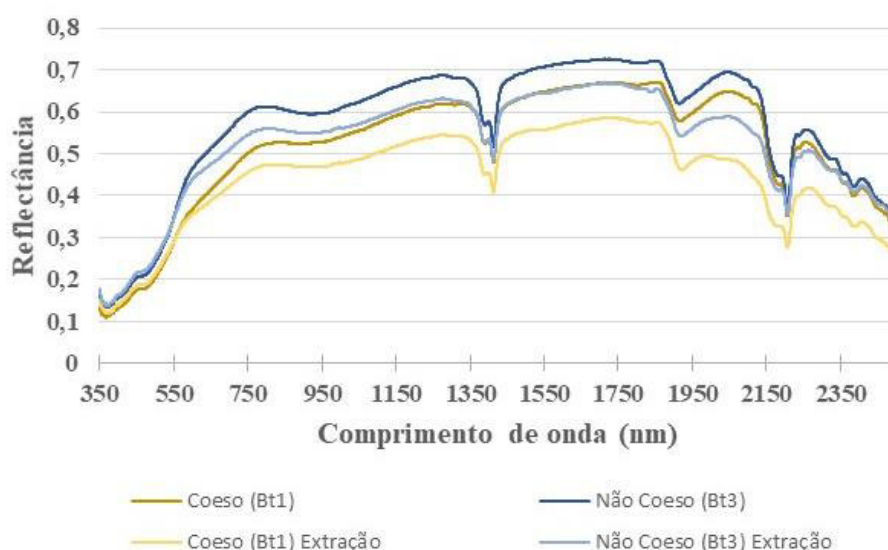


Fonte: Elaborada pela autora.

Assim como nos demais solos, as curvas sofreram redução na reflectância após extração do material amorfo, o que fica mais evidente a partir de 550 nm, mantendo as mesmas feições destacadas.

Em Sergipe (Figura 10), pode-se observar as feições do grupo OH, da caulinita e dos óxidos, inclusive uma concavidade em 600 nm também atribuída à presença de goethita (FANG *et al.*, 2018). No horizonte Bt1 com caráter coeso, a reflectância é menor devido ao maior teor de carbono orgânico (Tabela 6). Após extração do material amorfo observa-se, da mesma forma dos demais solos, o rebaixamento das curvas.

Figura 10 – Curvas espectrais dos horizontes com e sem o caráter coeso estudados em Sergipe antes e após extração do material amorfo.



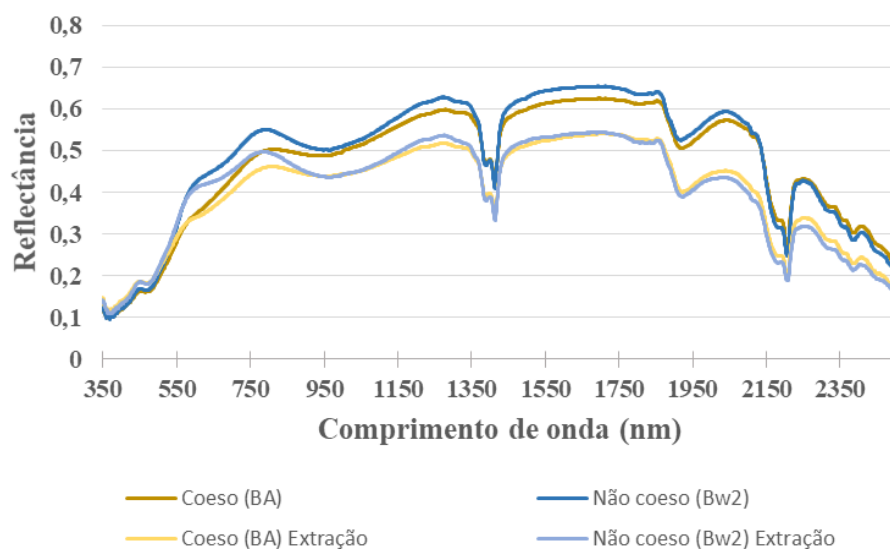
Fonte: Elaborada pela autora.

Em Alagoas (Figura 11), mesmo se tratando de um Latossolo as curvas se mantiveram semelhantes aos demais Argissolos estudados, apresentando feições em 600, 900, 1400 e 1900 e 2200 nm referentes aos óxidos de ferro, nesse caso a goethita, ao grupo OH e caulinita. As curvas espectrais de solos de classes diferentes podem mostrar semelhanças na forma geral e na posição das características de absorção, que se relacionam com os principais constituintes do solo, quando apresentam processos de formação e características composicionais que se traduzem em curvas espectrais semelhantes (VASQUES *et al.*, 2014).

A quantidade de carbono orgânico no horizonte com caráter coeso BA foi a maior observada (Tabela 6), resultando na menor intensidade de reflectância mesmo tendo maior quantidade de areia que o horizonte sem caráter coeso (Bw2), comportamento também

observado nos demais solos; após a extração do material amorfo a reflectância também é reduzida a partir dos 550 nm nos dois horizontes.

Figura 11 – Curvas espectrais dos horizontes com e sem caráter coeso estudados em Alagoas antes e após extração do material amorfo.



Fonte: Elaborada pela autora.

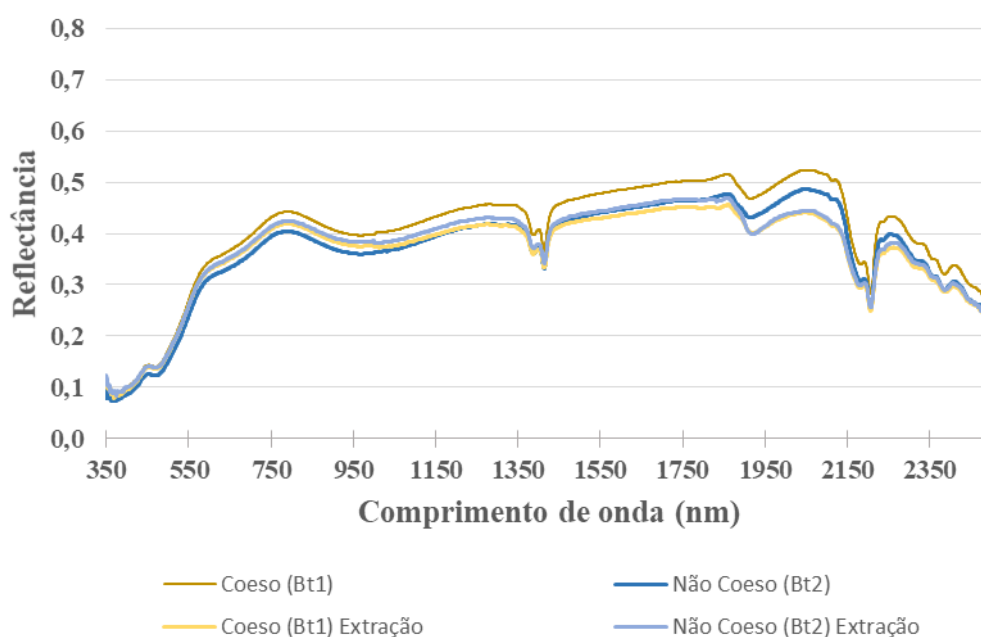
A intensidade de reflectância das curvas é menor que a dos solos observados anteriormente, por se tratar de um solo de textura mais argilosa (Tabela 4). Solos com maior quantidade de argila têm maior superfície específica, causando o aumento da reflexão entre as superfícies expostas e dificultando o escape da luz, diferente do que ocorre para solos arenosos, que apresentam menor área de superfície das partículas em relação ao seu volume e, consequentemente, maior reflectância (EITELWEIN, 2017). A constituição mineral, rica em quartzo, também contribui para a maior reflectância dos solos arenosos (DALMOLIN *et al.*, 2005).

Na Bahia (Figura 12), os horizontes com (Bt1) e sem o caráter coeso (Bt2) apresentaram os menores valores de reflectância em relação aos demais Estados. Exetando o horizonte com caráter coeso de Alagoas, foram os únicos enquadrados na classe textural argilosa, que juntamente com os teores de carbono orgânico (Tabela 6) contribuem para a menor reflectância.

Nas quatro curvas é possível observar as feições referentes à presença de óxidos e da goethita, do grupo OH e da caulinita bem acentuadas, mas não com a mesma intensidade observada nos demais solos. A diferença após a retirada do material amorfo também é menos

expressiva. O horizonte com caráter coeso apresentou o rebaixamento da curva como nos demais solos, e o sem caráter coeso foi o único a apresentar aumento da reflectância até aproximadamente o comprimento de 1300 nm. A granulidade apresentada pelo material após a extração foi menos expressiva, o que pode justificar a maior proximidade entre as curvas.

Figura 12 – Curvas espectrais dos horizontes com e sem caráter coeso estudados na Bahia antes e após extração do material amorfo.



Fonte: Elaborada pela autora.

6.3.1 Análise da primeira derivada

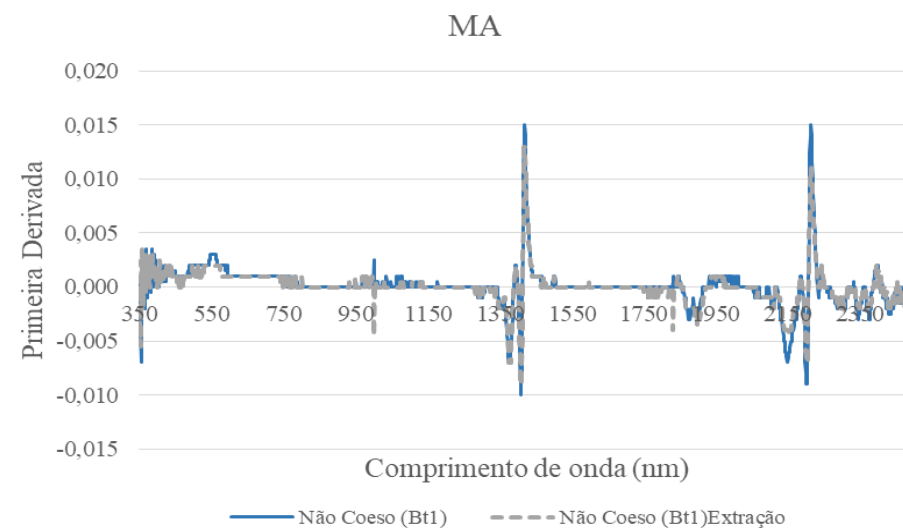
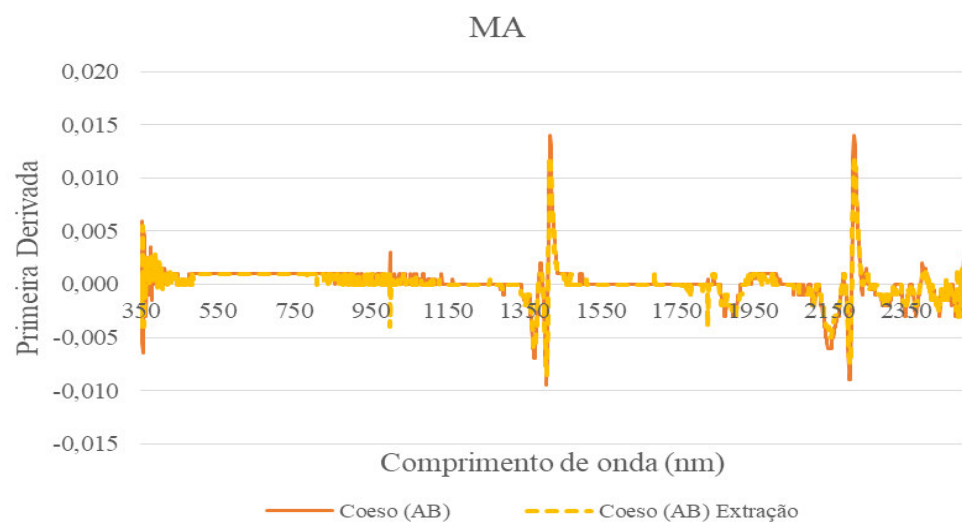
O uso da primeira derivada permite destacar as partes do espectro onde ocorrem menores variações de reflectância. Pontos importantes nos solos estudados e que já foram observados nas curvas espectrais, como a presença dos óxidos de ferro, do grupo OH e da caulinita, ficam mais evidentes como mostra a Figura 13; também pode-se observar na figura a redução dos picos em aproximadamente 1400 e 2200 nm após a extração do material amorfo, padrão que se repete em todos os solos.

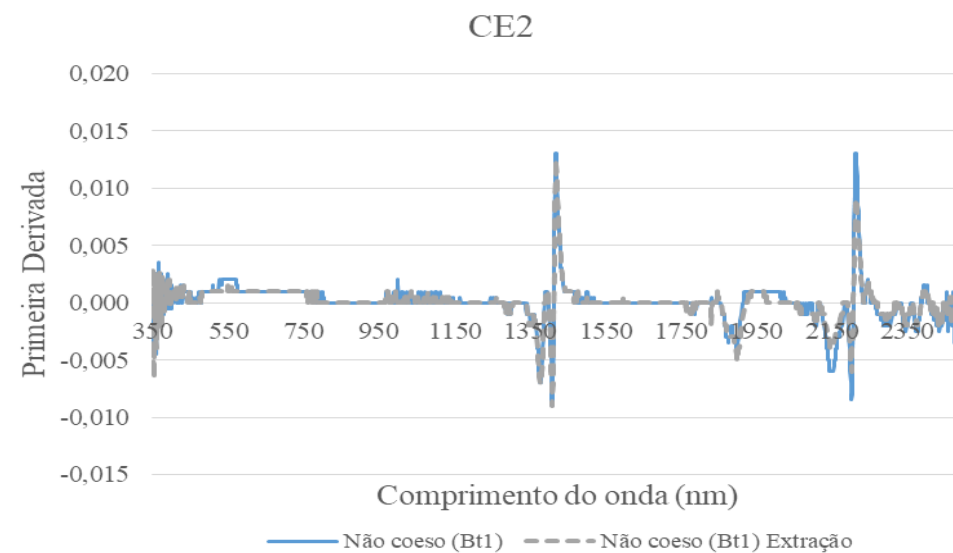
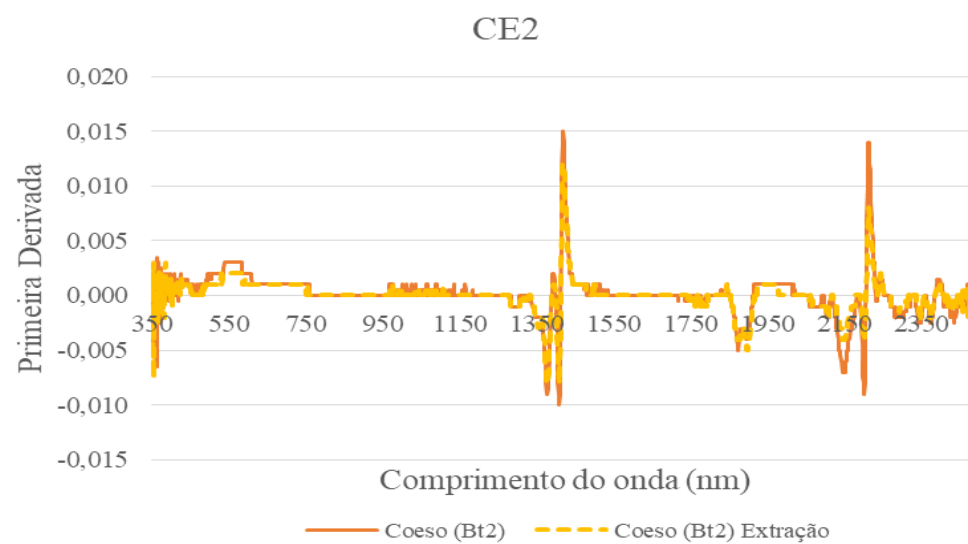
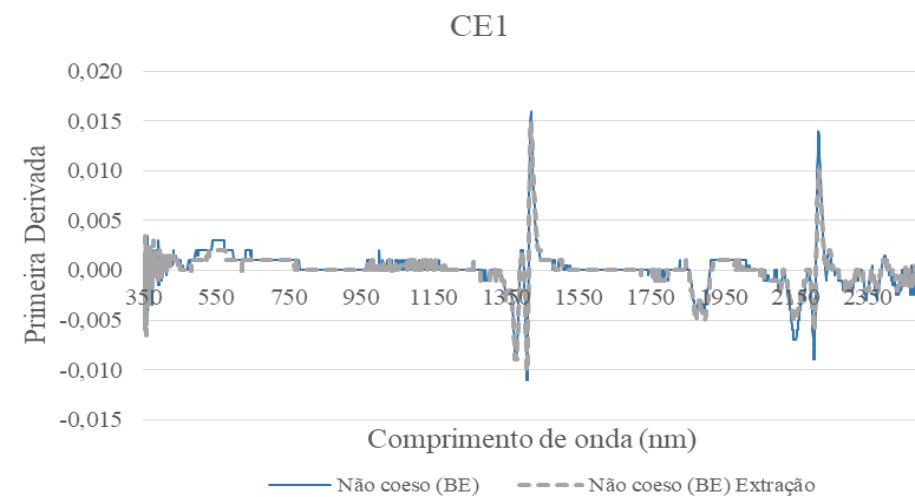
Como mencionado, a textura do solo após a extração pode estar influenciando a intensidade das curvas e reduzindo os picos de absorção. Outro fator a ser considerado é o uso do oxalato, um dos principais métodos para extração do material amorfo, considerado confiável para a maioria dos solos (PANSU; GAUTHEYROU, 2006), pode apresentar

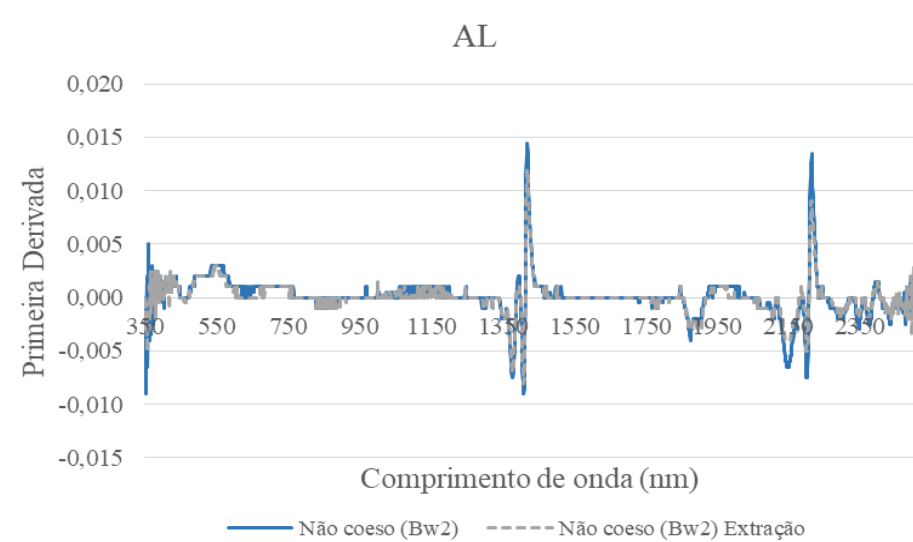
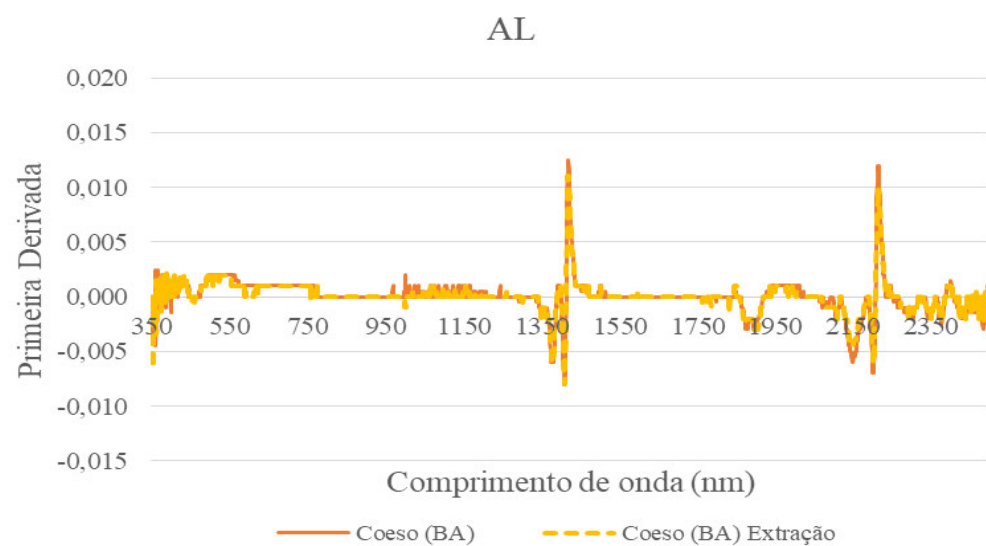
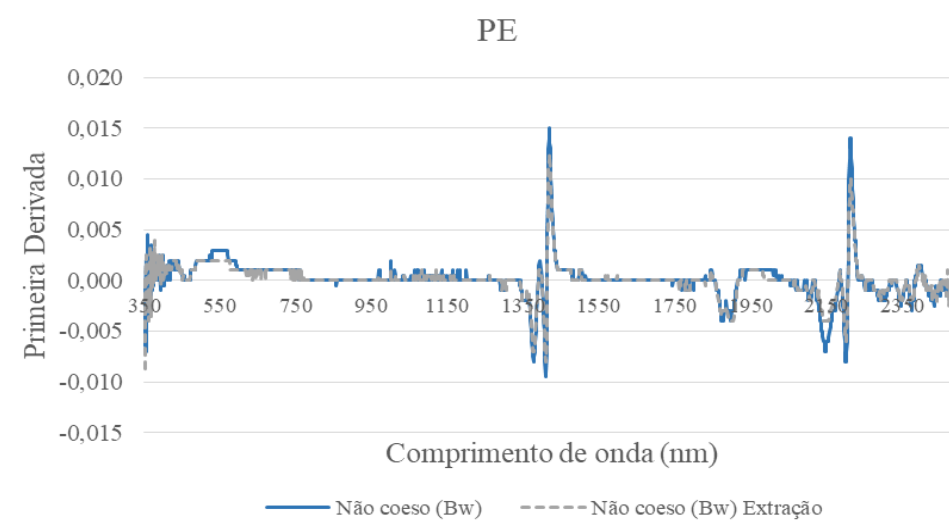
restrições, pois, dependendo da composição do solo, minerais de melhor cristalinidade podem ser atacados pelo reagente (RENNERT, 2018).

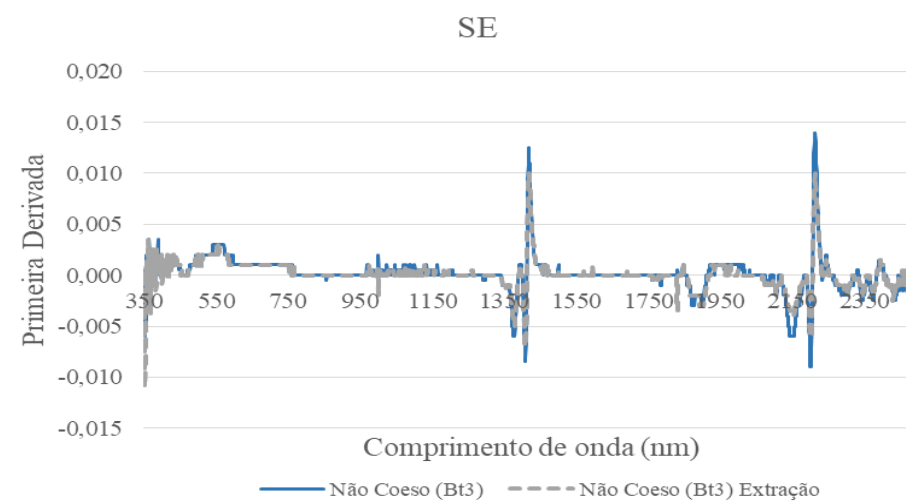
No Maranhão (Figura 13), destaca-se que as oscilações próximas aos 550 nm, que podem ser observadas também nos outros solos indicando a presença de óxidos de ferro, não estão presente no horizonte com caráter coeso AB, como mencionado é um horizonte mais acinzentado.

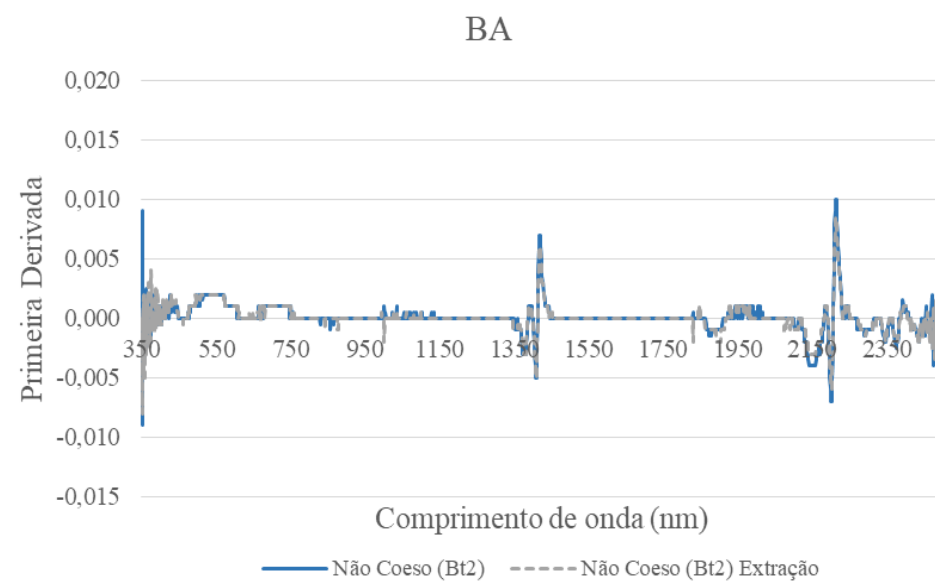
Figura 13 – Primeira derivada dos horizontes com e sem o caráter coeso antes e depois da extração do material amorfo em todos os solos estudados.











Fonte: Elaborada pela autora.

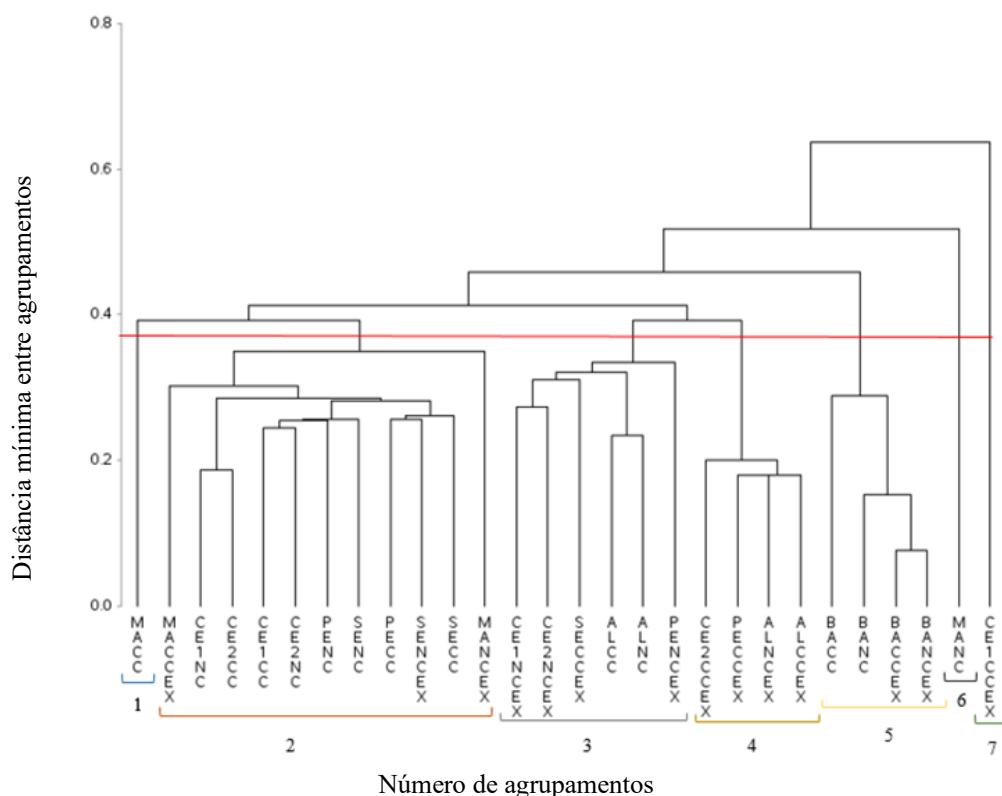
6.3.2 Análise de Agrupamento

Com a análise de agrupamento (clustering), buscou-se identificar as similaridades entre os horizontes com e sem o caráter coeso, antes e após a extração do material amorfo, de acordo com os dados espectrais obtidos.

O método da ligação simples (single linkage) também denominado “método do vizinho mais próximo”, proposto originalmente por Florek *et al.* (1951) é utilizado na análise de agrupamento hierárquico (FERREIRA *et al.* 2020), o dendrograma obtido a partir desse método mostra uma estrutura com toda a hierarquia dos agrupamentos gerados possibilitando a escolha do nível de corte que corresponde ao conjunto de clusters mais apropriado para a aplicação (METZ, 2006).

Conforme se observa na Figura 14, pode-se distinguir sete agrupamentos considerando a linha de corte logo abaixo da distância mínima de 0,4.

Figura 14 – Dendrograma de distribuição dos horizontes com e sem o caráter coeso, antes e depois da extração em todos os Estados estudados, com indicação dos grupos identificados para a altura de corte considerada.



Fonte: Elaborada pela autora.

O primeiro agrupamento é formado apenas pelo horizonte maranhense com caráter coeso (MACC), que se destacou por não apresentar feições características de óxidos de ferro, como anteriormente mencionado a cor acinzentada do horizonte indica perda desses elementos. O horizonte maranhense sem o caráter coeso (MANC) apresentou uma curva espectral com alta reflectância, isso se deve ao horizonte ter apresentado também a maior quantidade de areia fina (Tabela 5), pois o aumento da proporção de areia fina e areia muito fina provoca aumento da reflectância em solos de textura arenosa (DALMOLIN *et al.*, 2005), ficando sozinho no sexto agrupamento.

O segundo *cluster* é o maior dos agrupamentos com representantes de solos de praticamente todos os estados (MACCEX, CE1NC, CE2CC, CE1CC, CE2NC, PENC, SENC, PECC, SENCEX, SECC, MANCEX), com e sem caráter coeso, antes e após a extração, o que reforça as semelhanças na forma geral e na posição das características de absorção discutidas ao longo deste trabalho, que se relacionam com os principais constituintes do solo.

No terceiro *cluster* os horizontes alagoanos antes da extração (ALCC e ALNC), que apresentaram menor reflectância, se juntaram aos solos do Ceará, Sergipe e Pernambuco após a extração, CE1NCEX, CE2NCEX, SECCEX e PENCEX respectivamente. Esses solos apresentaram curvas com altas reflectâncias que sofreram significativa redução após a extração do material amorfo se aproximando do observado para os solos alagoanos.

De forma semelhante, no quarto *cluster*, os solos que apresentaram textura argilosa e argiloarenosa (ALCCEX, ALNCEX e CE2CCEX) com uma curva de menor reflectância ainda mais reduzida após a extração, se agruparam ao horizonte coeso de Pernambuco (PECCEX), mesmo este apresentando textura mais arenosa, o que deve ser devido ao rebaixamento significativo da curva após a extração.

Os solos baianos, com e sem o caráter coeso, antes e após a extração (BACC, BANC, BACCEX, BANCEX) ficaram em um único agrupamento, e apresentaram, além das mais baixas reflectâncias, feições menos acentuadas em 1400, 1900 e 2200 nm, diferente do que foi observado nos demais solos.

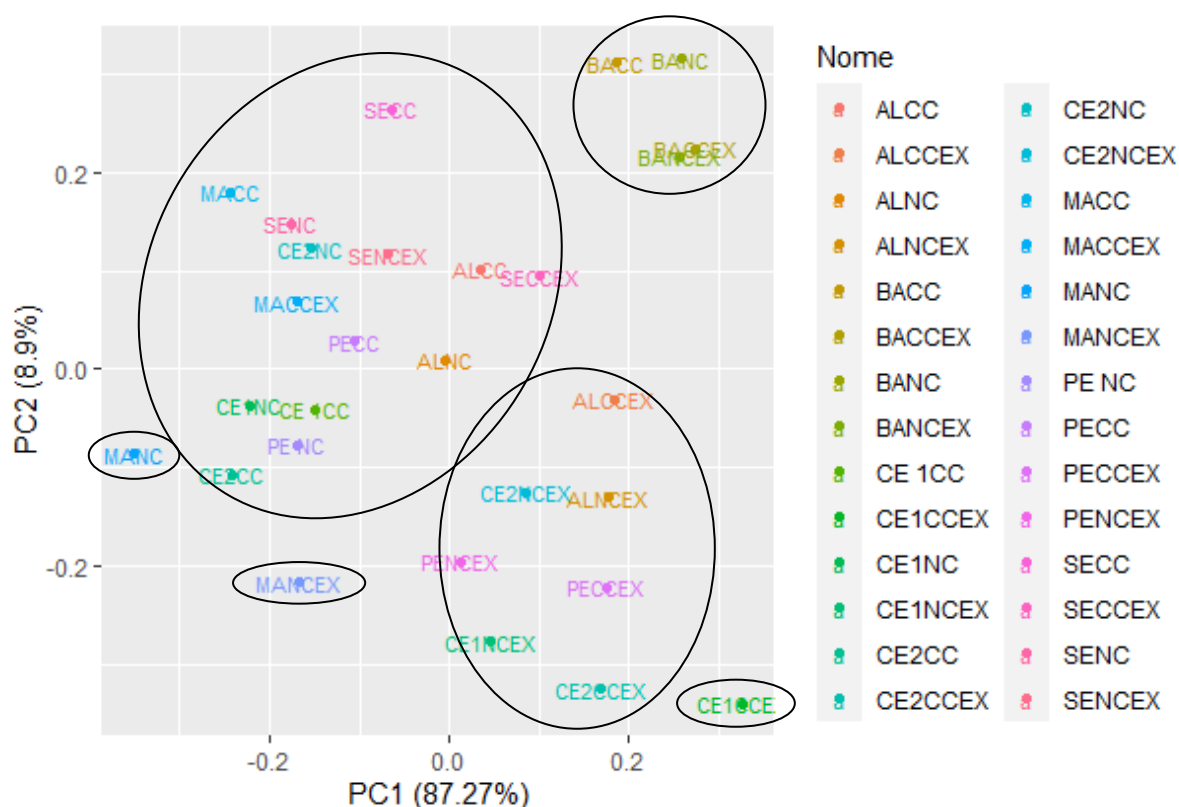
O horizonte com caráter coeso do perfil CE1 após a extração (CE1CCEX) se isola dos demais; a redução da reflectância nesse horizonte foi bastante acentuada separando-o dos demais solos cearenses.

6.3.2 Análise de Componentes Principais

A análise de componentes principais (ACP) é uma técnica estatística de análise multivariada, que está associada à ideia de redução do conjunto de dados, com menor perda possível da informação, concentrando as informações significativas nas primeiras componentes geradas pela transformação. Esta técnica pode ser utilizada para geração de índices e agrupamento de indivíduos, pois agrupa os indivíduos de acordo com sua variação dentro da população (HONGYU *et al.*, 2016).

Assim como na análise de agrupamento, a ACP foi aplicada aos dados espectrais dos solos com e sem o caráter coeso, antes e após a extração do material amorfo e como é possível observar na figura 15, os dois primeiros componentes principais explicaram 96,17% da variação total dos dados.

Figura 15: Gráfico de dispersão com dois componentes principais.



Fonte: Elaborada pela autora.

De forma semelhante ao observado na análise de agrupamento, os solos da Bahia formam um grupo isolado, novamente os menores valores de reflectância, feições menos

acentuadas, o enquadramento na classe textural argilosa juntamente com a presença de matéria orgânica contribuem para os diferenciar do que foi observado nos demais solos.

Na extremidade logo abaixo e a direita do gráfico está o solo com caráter coeso do perfil CE1 que após a extração (CE1CCEX) apresentou uma redução significativa da reflectância, mas manteve as características das feições semelhantes aos demais solos do estado. O horizonte maranhense sem o caráter coeso (MANC), assim como na análise de agrupamentos também se destaca em oposição ao solo CE1CCEX, justamente pela alta reflectância. Mesmo após a extração esse horizonte (MANCEX) ainda se mantém isolado, o que deve estar relacionado as feições iniciais da curva referente a presença dos óxidos de ferro, menos acentuadas.

Por fim, podemos considerar o restante dos solos separados em dois grandes grupos, o primeiro se assemelhando ao *cluster* 2 da análise de agrupamento e o segundo aos *clusters* 3 e 4, novamente reforçando as semelhanças de forma geral nas feições discutidas ao longo deste trabalho, que se relacionam com os principais constituintes do solo, e a influência da intensidade de reflectância no agrupamento dos dados.

7 CONCLUSÕES

Os horizontes apresentaram, em geral, classe textural franco argiloarenosa; a fração areia predominante foi a média e o grau de seleção foi moderadamente selecionado, indicando que a ocorrência desses parâmetros é importante, mas devem ocorrer aliados a outros fatores, como a presença dos compostos amorfos, para o surgimento do caráter coeso.

Por meio da espectroscopia de reflectância na faixa do visível, infravermelho próximo e ondas curtas foi possível identificar diferenças entre as curvas espectrais dos horizontes com e sem o caráter coeso, de forma geral, apresentaram feições de absorção semelhantes, com as intensidades de reflectância variando de acordo com a textura e quantidade de matéria orgânica. Quanto as curvas espectrais antes e após a extração do material amorfo nos solos analisados, a principal diferença também foi referente à intensidade de reflectância, sendo observado rebaixamento geral das curvas.

O uso da primeira derivada permitiu destacar as principais feições observadas nos horizontes dos solos estudados referentes à presença dos óxidos de ferro, grupo OH e caulinita sem, portanto, permitir diferenciação específica entre horizontes com e sem caráter coeso, já com a extração do material amorfo é possível destacar redução nos picos referentes à caulinita

tanto em horizontes com caráter coeso quanto nos sem o atributo, o que pode estar ligado ao método de extração, mas que deve ser mais profundamente avaliado.

A análise de agrupamento e de componentes principais confirmaram as semelhanças na forma geral e na posição das características de absorção, que se relacionam com os principais constituintes do solo, mesmo para solos de estados diferentes com caráter coeso ou não e após extração, sendo a intensidade de reflectância o maior fator para distinção dos grupos.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. M. S. S.; MENEZES, A. S.; ALENCAR, T. L.; SILVA, C. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G.; ALMEIDA, B. G.; MOTA, J. C. A. Tensile strength in horizons with and without cohesive character: variability and relation with granulometry. *Catena*, [S.l.], v. 166, p. 290-297, 2018.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; LOPES, A. S. Descrição morfológica de um Argissolo Amarelo e Latossolo Amarelo. Fortaleza: UFC, 2019. (Informação pessoal).
- ARAÚJO FILHO, J. O.; ALMEIDA, B. G.; ANDRADE, R. K. Descrição morfológica de um Argissolo Amarelo. In: ANDRADE, K. R. **Atributos físico-hídricos de solos coesos da Zona da Mata de Pernambuco sob ação de condicionadores químicos**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Departamento de Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2014.
- ARAÚJO FILHO, J. C. **Horizontes cimentados em argissolos e espodossolos dos tabuleiros costeiros e em neossolos regolíticos e planossolos da depressão sertaneja no nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 2003.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; CARVALHO, A.; SILVA, F. B. R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. In: **WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS**, Aracaju, 2001. Anais. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.123-142.
- ASFAW, E.; SURYABHAGAVAN, K. V.; ARGAW, M. Soil salinity modeling and mapping using remote sensing and GIS: The case of Wonji sugar cane irrigation farm, Ethiopia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. v. 17, n. 3, p. 250-258, 2018.
- BELLINASSO, H.; DEMATTÊ, J. A. M.; ROMEIRO, S. A.; Soil spectral library and its use in soil classification. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 861–870, 2010.
- BEZERRA, C. E. E.; FERREIRA, T. O.; ROMERO, R. E.; MOTA, J. C. A.; VIEIRA, J. M.; DUARTE, L. R. S.; COOPER, M. Genesis of cohesive soil horizons from northeast Brazil: Role of argilluviation and sorting of sand. *Soil Research*, v. 53, p. 43, 2014.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. Métodos de análise química, mineralógica e física dos solos do IAC. Campinas, Instituto Agrônomo. 2009. 77 p. (Boletim técnico 106, edição revisada e atualizada).
- CINTRA, F. L. D.; PORTELA, J. C.; NOGUEIRA, L. C. Caracterização física e hídrica em solos dos Tabuleiros Costeiros no Distrito de Irrigação Platô de Neópolis. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.8, n.1, p.45-50, 2004.

- COBLINSKI, J. A.; INDA, A. V.; DEMATTÊ, J. A. M.; DOTTO, A. C.; GHOLIZADEH, A.; GIASSON, E. Identification of minerals in subtropical soils with different textural classes by VIS–NIR–SWIR reflectance spectroscopy. **Catena**, v. 203, 2021.
- CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURI, N.; TORRE, T. C. P. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 297-313, 2008.
- CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; ARAÚJO FILHO, J. C. de; CAMÊLO, D. de L. Formas de Ferro, Silício e, ou, Alumínio na Gênese de Fragipãs e Horizontes Coesos dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 940-949, 2015.
- COSTA, O. D. V.; LIMA, A. V. Revisão da descrição do perfil da Reunião Técnica sobre solos coesos dos Tabuleiros Costeiros, publicado nos Anais, realizada em Cruz das Almas em 1996. Informação pessoal. Cruz das Almas: BA, 2019.
- CRUZ, M. A. S.; ROCHA, R. O. F.; SILVA, A. A. G.; AMORIM, J. R. A.; ARAGÃO, R. GeoTAB: Clima, recursos hídricos e bacias hidrográficas na região de atuação da Embrapa Tabuleiros Costeiros. **Scientia Plena**, v. 13, n. 10, p. 109914, 2017.
- DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; KLAMT, E.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.
- DEMATTÊ, J. A. M. Characterization and discrimination of soils by their reflected electromagnetic energy. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 10, p. 1445–1458, 2002.
- DEMATTÊ, J. A. M.; EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. (2003). Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. **Bragantia**, v. 62, n. 3, p. 451–464, 2003.
- DEMATTÊ, J. A. M.; TERRA, F. S. Spectral pedology: A new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations, **Geoderma**, v. 217-218, p. 190-200, 2014.
- DEMATTÊ, J. A. M.; ARAÚJO, S. R.; FIORIO, P. R.; FONGARO, C. T.; NANNI, M. R. Espectroscopia VIS-NIR-SWIR na avaliação de solos ao longo de uma topossequência em Piracicaba (SP). **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 4, p. 679–688, 2015.
- DEMATTÊ, J. A. M.; MORGAN, C.; CHABRILLAT, S.; RIZZO, R.; FRANCESCHINI, M.; TERRA, F. S.; VASQUES, G.; WETTERLIND, J. Spectral sensing from ground to space in soil science: State of the art, applications, potential and perspectives. In: THENKABAIL, P. S. **Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing**. CRC Press, 2015. p. 647-708.
- DEMATTÊ, J. A. M. *et al.* The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and Challenges. **Geoderma**, v. 354, p. 21, 2019.

- DUARTE L. R. S. **Pedogênese de horizontes com caráter coeso em duas topossequências nos Tabuleiros Costeiros do ceará**. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Solos e Nutrição de Plantas) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- DUNN, B. W.; BEECHER, H. G.; BATTEN, G. D.; CIAVARELLA, S. The potencial of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis – a case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 42, p. 607-614, 2002.
- EITELWEIN, M. T. **Sensoriamento proximal de solo para quantificação de atributos químicos e físicos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo Piracicaba. 2017.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2017. 574p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Delimitação da área foco de atuação da Embrapa Tabuleiros Costeiros e principais aspectos fisiográficos. Aracajú, Embrapa Tabuleiros Costeiros. 2015.41p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Reflectância espectral de solos. Planaltina: Embrapa, 2000. 55p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212p.
- EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. 1992. 132 p.
- FANG, Q.; HONG, H.; ZHAO, L.; KUKOLICH, S.; YIN, K.; WANG, C. Visible and nearinfrared reflectance spectroscopy for investigating soil mineralogy: a review. **Journal of Spectroscopy**. v. 2018, p. 1-14, 2018.
- FERREIRA, R. R. M.; PAIM, F. A. de P.; RODRIGUES, V. G. S.; CASTRO, G. S. A. Análise de cluster não supervisionado em R: agrupamento hierárquico. Campinas: Embrapa Territorial, 2020. 43p.
- FLORENZANO, T. G. Iniciação em sensoriamento remoto. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2011. 128 p.
- FLOREK, K.; LUCASZEWICZ, J.; PERKAL, J.; STEINHAUS, H.; ZUBRZYCKI, S. Sur la Liaison et la Division des Points d'un Ensemble Fini. **Colloquium Mathematicae**, v. 2, p. 282 -285, 1951.
- FOLK, R. L.; WARD, W. C. Brazos river bar: A study on the significance of grain-size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 27, p. 3-26, 1957.

FORMAGGIO, A. R., SANCHES, I. D. Sensoriamento remoto em agricultura. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 288p.

FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 467-474, 1996.

GE, Y.; MORGAN, C. L. S.; ACKERSON, J. P. VisNIR spectra of dried ground soils predict properties of soils scanned moist and intact, **Geoderma**, v. 221–222, p. 61-69, 2014.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n.3, p. 613-620, 2002.

GOMES, J. B. V.; ARAUJO FILHO, J. C. de; VIDAL-TORRADO, P.; COOPER, M.; SILVA, E. A. da; CURI, N. Cemented horizons and hardpans in the coastal tablelands of Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, 2017.

GREENE, R. S. B.; EGGLETON, R. A.; RENGASAMY, P. Relationships between clay mineralogy and the hardsetting properties of soils in the Carnarvon horticultural district of Western Australia. **Applied Clay Science**. v. 20, p. 211 – 223, 2002.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. de O. Análise de Componentes Principais: Resumo Teórico, Aplicação e Interpretação. **E&S Engineering and Science**, v. 5, p. 83–90, 2016.

JACOMINE, P. K. T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. In: CINTRA, F. L. D.; ANJOS, J. L.; IVO, W. M. P. M. (Eds.). **Anais do workshop coesão em solos dos Tabuleiros Costeiros**, Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 19–46.

JOHAS, R. A. L.; CLAESSEN, M. E. C.; DURIEZ, M. A. de M. Amorfos: identificação por diferentes metodologias em alguns solos do Acre. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997.

JONES, H. G.; VAUGHAN, R. A. Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications. **New York: Oxford University Press**. p. 384, 2010.

JONG VAN LIER, Q.; VIDAL-TORRADO, P. PHI: Programa de microcomputador para análise estatística da granulometria de sedimentos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, p. 277-281, 1992.

LIMA, H. V.; SILVA, A. P.; JACOMINE, P. T. K.; ROMERO, R. E.; LIBARDI, P. L. Identificação e caracterização de solos coesos no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 467-476, 2004.

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S de; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. de A. L. Caracterização e gênese do caráter coeso em latossolos amarelos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1001-1011, 2009.

- LIRA, R. A.; ARAÚJO, M. S. B.; ALMEIDA, B. G.; MARCELO, V. F. Uso agrícola e atributos físico-hídricos de solo coeso (Agricultural use and physical-hydric attributes of cohesive soil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 7, p. 2277-2289, 2016.
- LIU, J.; HAN, J.; ZHANG, Y.; WANG, H.; KONG, H.; SHI, L. Prediction of soil organic carbon with different parent materials development using visible-near infrared spectroscopy. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**. v. 204, p. 33–39, 2018.
- LU, P.; WANG, L.; NIU, Z.; LI, L.; ZHANG, W. Prediction of soil properties using laboratory VIS-NIR spectroscopy and Hyperion imagery. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 132, p. 26–33, 2013.
- MARTINS, J. A.; FIORIO, P. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; MIRANDA, J. H.; LELIS NETO, J. A. Sensoriamento remoto na determinação de atributos de um nitossolo sob aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**. v. 38, n. 3, p. 959–971, 2014.
- McKEAGUE, J. A.; DAY, J. H. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. **Canadian Journal Soil Science**, v. 46, p. 13-22, 1966.
- MELO FILHO, H. F. R.; ARAÚJO FILHO, J.O. Descrição de perfil (1984). In: NOGUEIRA, L. R. Q.; NOGUEIRA, L. C. (Eds.). **Anais da Reunião Técnica Sobre Solos dos Tabuleiros Costeiros**, Cruz das Almas: EMBRAPA- CPATC, 1996. p. 13–25.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005. 107p.
- MENESES, P. R.; DE ALMEIDA, T.; DE MELLO BAPTISTA, G. M. Reflectância dos materiais terrestres. Oficina de Textos. 2019.
- METZ, Jean. **Interpretação de clusters gerados por algoritmos de clustering hierárquico**. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- MOREAU, A. M. S. S. **Gênese, Mineralogia e Micromorfologia de Horizontes Coeso, Fragipã e Duripã Em Solos do Tabuleiro Costeiro do Sul da Bahia**. Tese (Doutorado em em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- MOREAU, A. M. S. S.; COSTA, L. M. da; KER, J. C.; GOMES, F. H. Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do tabuleiro costeiro do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 1021-1030, 2006.
- MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 4. Ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2011. 422 p.
- MULDER, V. L.; DE BRUIN, S.; SCHAEPMAN, M. E.; MAYR, T. R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping – a review. **Geoderma**. v. 162 (1), p.1-19, 2011.

- MULLER, E.; DÉCAMPS, H. Modeling soil moisture – reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 2, p 173-180, 2001.
- NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Spectral Reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 393–407, 2006.
- NOCITA, M.; STEVENS, A.; VAN WESEMAEL, B.; BROWN, D.; SHEPHERD, K.; TOWETT, E.; VARGAS, R.; MONTANARELLA, L. Soil spectroscopy: an opportunity to be seized. **Global Change Biology**, v. 21, p. 10-11, 2015.
- NOCITA, M.; STEVENS, A.; NOON, C.; WESEMAEL, B.V. Prediction of soil organic carbon for different levels of soil moisture using Vis-NIR spectroscopy. **Geoderma**, v. 199, p. 37–42, 2013.
- NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 4ª. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 388 p.
- PACHECO, A. P.; FREIRE, N. C. F.; BORGES, U. N. Uma contribuição do sensoriamento remoto para detecção de áreas degradadas na caatinga brasileira. **Boletim Goiano de Geografia**. V. 26, n.1, p. 50-68, 2006.
- PANSU, M.; GAUTHEYROU, J. **Handbook of Soil Analysis Mineralogical, Organic and Inorganic Methods**, Springer, 2006, 993p.
- NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F. J. Introdução ao Sensoriamento Remoto. INPE. São José dos Campos, 2001.
- R Core Team (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- RENNERT, T. Wet-chemical extractions to characterise pedogenic Al and Fe species—A critical review. **Soil Research** v. 57, p. 1–16, 2018.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B. de; CORRÊA, G. F. Pedologia: Base para distinção de ambientes. Mauro. – 6. ed. rev., amp. – Lavras: Editora UFLA, 378 p. 2014.
- RIBEIRO, L. P. Evolução da cobertura pedológica dos tabuleiros costeiros e a gênese dos horizontes coesos. **Anais do workshop coesão em solos dos tabuleiros costeiros**, Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001, p. 93- 121.
- RIBEIRO, S. G. **Espectroscopia de reflectância na avaliação do carbono orgânico em solos do Semiárido**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Departamento de Solos da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2021.
- RIZZO, R.; MENDES, W. de S.; SILVERO, N. E. Q.; DOTTO, A. C.; SANTOS, N.V.; BONFATTI, B. R.; POPPIEL, R. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Point and Imaging Spectroscopy in Geospatial Analysis of Soils. In: MITRAN, T.; MEENA, R. S.; CHAKRABORTY, A. **Geospatial Technologies for Crops and Soils**. Springer Singapore, p. 277-317, 2021.

- RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M.; GALVÃO, L. S. Spectral mixture analysis of inland tropical Amazon floodplain waters using EO-1 Hyperion. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denver, USA. IEEE International, 2006.
- SANTANA, D. P.; MOURA FILHO, W. Estudos de solos do Triângulo Mineiro e de Viçosa. I. Mineralogia. **Experientiae**, Viçosa, v. 24, n. 6, p. 131-160, 1978.
- SANTANA, D. S.; PACHECO, E. P.; VALE, W. G.; CHAVES, M. V. S. Modelagem da transferência das pressões aplicadas na superfície de um argissolo do tabuleiros costeiros. **Scientific Electronic Archives**, v. 13, n. 7, 2020.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SAS STUDIO - University Edition, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, 2012-2018.
- SCHALLER, J.; PUPPE, D.; KACZOREK, D.; ELLERBROCK, R.; SOMMER, M. Silicon Cycling in Soils Revisited. **Plants**, v. 10, n. 295, 2021.
- SILVA, M. B.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. Á de. (ed.). **Guia de campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC do Maranhão**. Brasília, DF: Embrapa, 2020.
- SILVA, C. P. **Gênese do Caráter Coeso: Relação da Resistência Tênsil com Atributos Físicos e Químicos do Solo**. Tese (Doutorado em Ciências do Solo). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2019.
- SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**. v. 66, p. 988-998, 2002.
- SOMMER, M.; KACZOREK, D.; KUZYAKOV, Y.; BREUER, J. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes—a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v. 169, p. 310-329, 2006.
- SORIANO-DISLA, J. M.; JANIK, L. J.; VISCARRA ROSSEL, R. A.; MACDONALD, L. M.; MCLAUGHLIN, M. J. The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 49, n.2, p. 139-186, 2014.
- SOUZA, L. S.; BORGES, A. L.; CINTRA, F. L. D.; SOUZA, L. D.; IVO, W. M. P. M. Perspectivas de uso dos solos dos Tabuleiros Costeiros. In: 500 ANOS DE USO DO SOLO NO BRASIL, Ilhéus, 2002. Anais. Ilhéus, Editus, 2002. p.521-579.
- SOUZA, L. S. Uso e manejo dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Cruz das Almas,

1996. **Anais**. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1996. p. 36-75.
SSSA, 1986. p. 69-97.

STONER, E. R.; BAUMGARDNER, M. F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society of America Journal**. v. 45, p. 1161–1165, 1981.

TERRA, F. S. **Espectroscopia de reflectância do visível ao infravermelho médio aplicada aos estudos qualitativos e quantitativos de solos**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2011.

VASQUES, G. M.; DEMATTÊ, J. A. M.; VISCARRA ROSSEL, R. A.; RAMÍREZ-LÓPEZ, L.; TERRA, F. S. Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectance spectra from multiple depths. **Geoderma**, v. 223–225, p. 73-78, 2014.

VIEIRA, J. M. **Fatores físicos e agentes químicos envolvidos na gênese de solos com caráter coeso**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo - Pedologia) - Departamento de Solos da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

VIEIRA, J. M. **Contribuição de compostos de baixa cristalinidade e ciclos de umedecimento e secagem na gênese do caráter coeso em solos do Ceará**. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas) - Departamento de Solos da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

VIEIRA, J. M.; ROMERO, R. E.; FERREIRA, T. O.; ASSIS JÚNIOR, R. N. de. Contribuição de material amorfo na gênese de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 4, p. 623-632, 2012.

VISCARRA ROSSEL, R. A. *et al.* A global spectral library to characterize the world's soil, **Earth-Science Reviews**, v. 155, p.198-230, 2016.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; JEON, Y. S.; ODEH, I. O. A.; MCBRATNEY, A. B. Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. **Australian Journal of Soil Research**, v. 46, p. 1-16, 2008.