



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO CIÊNCIAS AGRONÔMICAS E FLORESTAIS
CURSO DE AGRONOMIA

MARX LIMA DA CUNHA

**AVALIAÇÃO DA SAÚDE DO SOLO DE AGROECOSSISTEMAS DE BASE
FAMILIAR POR MEIO DA CROMATOGRÁFIA DE PFEIFFER E ATRIBUTOS
FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO**

MOSSORÓ

2025

MARX LIMA DA CUNHA

AVALIAÇÃO DA SAÚDE DO SOLO DE AGROECOSSISTEMAS DE BASE FAMILIAR
POR MEIO DA CROMATOGRAFIA DE PFEIFFER E ATRIBUTOS FÍSICOS E
QUÍMICOS DO SOLO

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Agronomia

Orientador: JEANE CRUZ PORTELA, Prof.
Dr.

Co-orientador: EULENE FRANCISCO DA
SILVA, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2025

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

C972a Cunha, Marx.
AVALIAÇÃO DA SAÚDE DO SOLO DE AGROECOSSISTEMAS
DE BASE FAMILIAR POR MEIO DA CROMATOGRAFIA DE
PFEIFFER E ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO /
Marx Cunha. - 2025.
35 f. : il.

Orientadora: Jeane Cruz Portela.
Coorientadora: Eulene Francisco da Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Agronomia, 2025.

1. Semiárido. 2. Carbono Orgânico Total. 3.
Avaliação qualitativa. 4. Manejo sustentável do
solo. 5. Monitoramento ambiental. I. Cruz
Portela, Jeane, orient. II. Francisco da Silva,
Eulene, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MARX LIMA DA CUNHA

**AVALIAÇÃO DA SAÚDE DO SOLO DE AGROECOSSISTEMAS DE BASE
FAMILIAR POR MEIO DA CROMATOGRÁFIA DE PFEIFFER E ATRIBUTOS
FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Agronomia

Defendida em: 16 / 12 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JEANE CRUZ PORTELA**
Data: 17/12/2025 06:25:33-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Jeane cruz portela, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **JOAQUIM EMANUEL FERNANDES GONDIM**
Data: 17/12/2025 17:00:17-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Joaquim Emanuel Fernandes Gondim, Prof. Dr. (UVA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **WEDSON ALEFF OLIVEIRA DA SILVA**
Data: 17/12/2025 16:31:40-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Wedson Aleff Oliveira da Silva, Mestre (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **JUSSIARA SONALLY JACOME CAVALCANTE**
Data: 18/12/2025 14:58:27-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Jussira Sonally Jácome Cavalcante, Pesq. Dra. (INSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, e a minha família por me conceder força, saúde e sabedoria ao longo de toda essa jornada, iluminando meus caminhos mesmo nos momentos mais difíceis e me permitindo chegar até aqui.

À Universidade Federal do Semiárido (UFERSA), por todo o suporte acadêmico, estrutural e humano oferecido durante minha formação, contribuindo de forma decisiva para o meu crescimento profissional e pessoal.

À minha orientadora, Prof.^a Jeane Cruz Portela e minha co-orientadora Eulene Francisco da Silva, pela dedicação, paciência, competência e ensinamentos compartilhados ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para a construção deste TCC, bem como para meu amadurecimento acadêmico e científico.

Aos meus amigos e colegas de curso, que estiveram presentes ao longo dessa caminhada, compartilhando conhecimentos, desafios, conquistas e momentos de apoio mútuo. Cada conversa, incentivo e ajuda contribuíram significativamente para que essa etapa fosse concluída.

A todos os amigos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa jornada, oferecendo palavras de encorajamento, compreensão e companheirismo nos momentos de cansaço e incerteza.

Por fim, deixo meus sinceros agradecimentos a todos que acreditaram em mim e que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta importante etapa da minha vida acadêmica.

RESUMO

AVALIAÇÃO DA SAÚDE DO SOLO DE AGROECOSSISTEMAS DE BASE FAMILIAR POR MEIO DA CROMATOLOGRAFIA DE PFEIFFER E ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO

A qualidade do solo é determinante para a sustentabilidade dos agroecossistemas, especialmente em regiões semiáridas, onde práticas inadequadas de uso e manejo podem intensificar processos de degradação edáfica. Assim, a avaliação integrada dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo torna-se fundamental para subsidiar estratégias de manejo conservacionistas e promover a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Métodos qualitativos, como a Cromatografia Circular de Pfeiffer (CCP), têm sido utilizados como ferramentas complementares às análises laboratoriais convencionais, pois permitem uma leitura integrada da funcionalidade do solo de forma acessível e de baixo custo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial da Cromatografia Circular de Pfeiffer como ferramenta qualitativa de diagnóstico da qualidade do solo, relacionando seus descritores visuais com atributos físicos e químicos clássicos em diferentes usos da terra no semiárido potiguar. A pesquisa foi conduzida em área de agricultura familiar no município de Upanema, Rio Grande do Norte, sob clima semiárido (BSh), avaliando quatro agroecossistemas dispostos em uma topossequência: Latossolo sob vegetação nativa, Vertissolo sob pastagem de ovinos, Cambissolo sob horta orgânica e Argissolo sob pastagem nativa, nas camadas de 0,00–0,15 m e 0,15–0,30 m. Foram realizadas análises físicas e químicas do solo, incluindo textura, densidade, porosidade, atributos hídricos, bases trocáveis, fósforo disponível e carbono orgânico total. Paralelamente, foram elaborados cromatogramas circulares de Pfeiffer, avaliados por meio de *scores* atribuídos às características visuais de integração, plumas, picos e coloração. Os dados quantitativos foram analisados por meio de correlação de Pearson, análise fatorial e análise de componentes principais. A análise fatorial explicou 83,59% da variabilidade total dos dados, enquanto a análise de componentes principais discriminou claramente os usos da terra. As áreas sob vegetação nativa e horta orgânica apresentaram maiores teores de COT, melhor estabilidade estrutural e os maiores *scores* cromatográficos, caracterizados por maior integração entre zonas, plumas bem desenvolvidas e coloração homogênea. Em contraste, as áreas de pastagem, especialmente no Argissolo, apresentaram menores valores de COT, limitações físicas e menores *scores* cromatográficos, refletindo menor qualidade do solo. Conclui-se que a CCP mostrou elevada concordância com os atributos físicos e químicos, configurando-se como

ferramenta qualitativa eficiente e complementar para o diagnóstico da qualidade do solo no semiárido.

Palavras chaves: Semiárido; Carbono Orgânico Total; Avaliação qualitativa; Manejo sustentável do solo; Monitoramento ambiental.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF SOIL HEALTH IN FAMILY-BASED AGROECOSYSTEMS USING PFEIFFER CHROMATOGRAPHY AND PHYSICAL AND CHEMICAL SOIL ATTRIBUTES

Abstract

Soil quality is a key factor for the sustainability of agroecosystems, especially in semi-arid regions, where inadequate land use and management practices can intensify soil degradation processes. Therefore, an integrated assessment of the physical, chemical, and biological attributes of the soil is essential to support conservation management strategies and promote the sustainability of productive systems. Qualitative methods, such as Pfeiffer Circular Chromatography (PCC), have been used as complementary tools to conventional laboratory analyses, as they allow an integrated and accessible evaluation of soil functionality at low cost. The objective of this study was to evaluate the potential of Pfeiffer Circular Chromatography as a qualitative tool for diagnosing soil quality, relating its visual descriptors to classical physical and chemical soil attributes under different land use systems in the semi-arid region of Rio Grande do Norte, Brazil. The research was conducted in a family farming area in the municipality of Upanema, Rio Grande do Norte, under a semi-arid climate (BSh), assessing four agroecosystems arranged along a toposequence: Ferralsol under native vegetation, Vertisol under sheep pasture, Cambisol under organic horticulture, and Acrisol under native pasture, at depths of 0.00–0.15 m and 0.15–0.30 m. Soil physical and chemical analyses were performed, including texture, bulk density, porosity, hydraulic attributes, exchangeable bases, available phosphorus, and total organic carbon (TOC). In parallel, Pfeiffer circular chromatograms were produced and evaluated using scores assigned to visual characteristics such as integration, plumes, peaks, and coloration. Quantitative data were analyzed using Pearson correlation, factor analysis, and principal component analysis. Factor analysis explained 83.59% of the total data variability, while principal component analysis clearly discriminated land use systems. Areas under native vegetation and organic horticulture showed higher TOC contents, better structural stability, and the highest chromatographic scores, characterized by greater zone integration, well-developed plumes, and homogeneous coloration. In contrast, pasture areas, especially the Acrisol, exhibited lower TOC values, physical limitations, and lower chromatographic scores, reflecting reduced soil quality. It is concluded that Pfeiffer Circular Chromatography showed high concordance with physical and chemical soil attributes,

confirming its effectiveness as a qualitative and complementary tool for soil quality diagnosis in semi-arid environments.

Keywords: Semi-arid; Total Organic Carbon; Qualitative assessment; Sustainable soil management; Environmental monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização dos solos usados no estudo	25
Figura 2 – Uso e ocupação das terras na comunidade rural de Piracicaba/RN	26
Figura 3 – Exemplo de divisão em zonas no cromatograma	28
Figura 4 – Seleção de cromatogramas exibindo valores mínimos, medianos e máximos em CZ	29
Figura 5 – Matriz de correlação entre as variáveis físicas e químicas e classes de solo em usos da terra, Piracicaba, Upanema-RN	30
Figura 6 – Componentes principais entre as principais variáveis físicas e químicas dos solos	33
Figura 7 – Cromatogramas circulares de Pfeiffer de agroecossistemas com diferentes formas de uso do solo	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização física e química dos solos avaliados nos diferentes usos da terra.....	27
Tabela 2 – Valores médios dos atributos físicos do solo nos diferentes agroecossistemas	31
Tabela 3 – Valores médios dos atributos químicos do solo nos diferentes agroecossistemas	32
Tabela 4 – Cargas fatoriais das variáveis físicas e químicas na análise fatorial	34
Tabela 5 – Scores atribuídos aos cromatogramas circulares de Pfeiffer e valores médios por uso do solo	35

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Atributos físicos do solo e sua relação com a funcionalidade	14
2.2 Carbono orgânico do solo e interação com os atributos físicos	15
2.3 Atributos químicos do solo e sua relação com a estrutura	15
2.4 Análises multivariadas aplicadas à avaliação da qualidade do solo	15
2.5 Cromatografia de Pfeiffer	16
3 MATERIAL E MÉTODOS	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 Matriz de correlação de Pearson	23
4.2 Análise fatorial	25
4.3 Análise de componentes principais	27
4.4 Cromatografia de Pfeiffer e relação com os atributos do solo	29
5 CONCLUSÕES	32
6.REFERÊNCIAS	33

1. Introdução

O solo, como matriz fundamental para a produção agrícola, exerce funções vitais no sequestro de carbono, na ciclagem de nutrientes e no suporte à biodiversidade do sistema edáfico. Nesse contexto, a avaliação da qualidade do solo vai além da simples mensuração de teores de nutrientes ou propriedades físico-químicas isoladas, exige abordagens integradas que expressem a funcionalidade do sistema solo-planta. A técnica da Cromatografia Circular de Pfeiffer (CCP), desenvolvida originalmente por Ehrenfried Pfeiffer, emerge como um método qualitativo que possibilita visualizar interações entre componentes químicos, físicos e biológicos do solo por meio de padrões cromatográficos (Hernández-Rodríguez et al., 2021; Kokornaczyk et al., 2016). Esse tipo de ferramenta assume especial relevância para a agronomia, pois pode oferecer diagnósticos rápidos e de baixo custo, com potencial aplicação no monitoramento da fertilidade de solos agrícolas.

A CCP tem uma abordagem cromatográfica que emprega fases líquidas imiscíveis em um arranjo circular para a separação de frações complexas presentes em solos, adubos e extratos vegetais (Carneiro e Campos, 2021). Na prática agrícola, a CCP tem sido utilizada como ferramenta de avaliação da qualidade do solo e de manejo agroecológico, especialmente em sistemas de agrofloresta, onde as frações cromatográficas podem correlacionar com indicadores microbiológicos e com mudanças na biomassa, na matéria orgânica e na disponibilidade de nutrientes (Reis et al., 2020). Kokornaczyk et al. (2016) evidenciaram correlações significativas entre descritores cromatográficos, como largura de zonas circulares e textura dos padrões, e variáveis químicas clássicas como matéria orgânica, nitrogênio total e fósforo assimilável. Essa integração entre o visual e o analítico abre caminho para a adoção da CCP como ferramenta complementar à análise tradicional, ampliando o arsenal metodológico disponível para agronomia e manejo sustentável.

A relação entre os padrões da CCP e os atributos físicos do solo, como densidade, porosidade, estabilidade de agregados, também ganha destaque quando consideramos a dinâmica do carbono orgânico total (COT), o qual influencia diretamente a estruturação do solo, o armazenamento de água, o fluxo de ar e a estabilidade dos agregados, impactando a produtividade e a resiliência dos sistemas agrícolas. Assim, estabelecer como os resultados da CCP se associam a esses atributos físicos torna-se uma ponte metodológica valiosa para entender a integridade edáfica. Estudos recentes, apresentam o CCP como uma ferramenta eficiente para análise da qualidade do solo ((Domingues et al., 2022; Carneiro et al., 2021; Graciano et al., 2020; Melo et al., 2019; Feliciano, 2018).

Ao mesmo tempo, a literatura alerta que a CCP requer padronização rigorosa (preparo do extrato, revelador, tempo de corrida e protocolos de leitura/digitalização) para garantir reprodutibilidade e interpretação consistente entre laboratórios, ponto crítico quando se busca relacioná-la a indicadores clássicos de físico-químicos do solo (estabilidade de agregados, condutividade hidráulica) e armazenamento de carbono (FORD et al., 2021). Além disso, pouco é o conhecimento das interações de métodos qualitativos e quantitativos dos atributos do solo, tendo em vista que as áreas destinadas ao sistema produtivo passam por processo de retirada da cobertura vegetal, o que leva a diversos questionamentos sobre as alterações ocorridas no ambiente. Considerando que, a avaliação da qualidade do ambiente é fundamental para auxiliar no planejamento de manutenção e/ou recuperação dos agroecossistemas, o objetivo desse estudo foi avaliar o potencial da Cromatografia Circular de Pfeiffer como ferramenta qualitativa de diagnóstico da qualidade do solo, relacionando seus descritores visuais com indicadores quantitativos clássicos, como carbono orgânico total e atributos físico-químicos.

2. Referencial Teórico

2.1. Atributos físicos do solo e sua relação com a funcionalidade

Os atributos físicos do solo exercem papel fundamental na determinação de sua funcionalidade, influenciando diretamente processos como infiltração e retenção de água, aeração, crescimento radicular e atividade biológica. Características como textura, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade estão intimamente relacionadas à organização estrutural do solo e ao seu comportamento hídrico (Ribeiro et al., 2007; Teixeira et al., 2017).

A textura do solo, definida pelas proporções relativas de areia, silte e argila e a fração orgânica do solo, condicionam a distribuição do espaço poroso. Solos com maior teor de argila tendem a apresentar maior microporosidade, favorecendo a retenção de água, enquanto solos mais arenosos geralmente apresentam predominância de macroporos, associados à drenagem rápida e maior aeração, porém com menor capacidade de armazenamento hídrico (Teixeira et al., 2017). Em ambientes semiáridos, essas características assumem relevância ainda maior, uma vez que a disponibilidade de água é um fator limitante para a produção agrícola (Ribeiro et al., 2007).

A estabilidade estrutural do solo pode ser avaliada por indicadores como o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP), que reflete a resistência dos agregados à desagregação. Solos com maior estabilidade estrutural tendem a apresentar melhor infiltração de água, menor suscetibilidade à erosão e maior proteção da matéria orgânica (Reichert et al., 2016).

2.2. Carbono orgânico do solo e interação com os atributos físicos

O carbono orgânico total (COT) é considerado um dos principais indicadores da qualidade do solo, por sua influência direta na estrutura, fertilidade e atividade biológica. A matéria orgânica atua como agente agregante, promovendo a formação e a estabilidade de agregados, além de contribuir para a melhoria da porosidade e da retenção de água (Six et al., 2004; Wiesmeier et al., 2019).

A interação entre COT e atributos físicos é particularmente importante em sistemas agrícolas, pois a perda de matéria orgânica pode resultar em degradação estrutural, aumento da densidade do solo e redução da infiltração de água. Por outro lado, manejos que favorecem o acúmulo de carbono orgânico tendem a melhorar simultaneamente os atributos físicos e químicos do solo, promovendo maior resiliência dos agroecossistemas (Lal, 2020).

2.3. Atributos químicos e sua relação com a estrutura do solo

Os atributos químicos do solo, como pH, fósforo disponível, bases trocáveis e sódio, influenciam diretamente a fertilidade e podem também afetar a estrutura do solo. A disponibilidade de nutrientes está relacionada à fração textural e à presença de matéria orgânica, que atua como reservatório e regulador da dinâmica iônica (Lal, 2020).

Em especial, a interação entre nutrientes e estabilidade de agregados tem sido associada ao papel da matéria orgânica como elo entre os componentes físicos e químicos do solo. Alterações nesses atributos podem refletir mudanças no manejo e no uso da terra, impactando a qualidade do solo ao longo do tempo (Reichert et al., 2016).

2.4. Análises multivariadas aplicadas à avaliação da qualidade do solo

A avaliação da qualidade do solo envolve um grande número de variáveis físicas e químicas, frequentemente inter-relacionadas. Nesse contexto, técnicas de análise multivariada, como a análise fatorial e a análise de componentes principais (ACP), têm sido amplamente utilizadas para reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar os atributos mais sensíveis às mudanças de manejo e uso da terra (Abdi & Williams, 2010).

A análise fatorial permite agrupar variáveis correlacionadas em fatores, facilitando a interpretação dos processos que controlam a variabilidade dos atributos do solo. Já a ACP possibilita a visualização da separação entre áreas ou sistemas de manejo, evidenciando padrões e associações entre variáveis e usos da terra (Abdi & Williams, 2010).

Essas abordagens têm se mostrado eficientes para integrar atributos físicos, químicos e biológicos, contribuindo para uma avaliação mais abrangente da qualidade do solo e servindo como suporte à interpretação de indicadores qualitativos e quantitativos em estudos agroambientais.

2.5. Cromatografia de Pfeiffer

A cromatografia constitui uma técnica físico-química de separação amplamente utilizada, na qual os componentes de uma mistura distribuem-se entre duas fases: uma estacionária, que permanece fixa, e outra móvel, que se desloca em direção definida, promovendo a diferenciação dos constituintes de acordo com suas afinidades relativas (PILON, 2018). Embora experimentos de separação baseados em adsorção datem do século XIX, o marco científico da cromatografia moderna é atribuído a Mikhail Tswett, que em 1903 demonstrou a separação de pigmentos de clorofila ao empregar solvente puro após a impregnação da amostra, procedimento que consolidou os fundamentos da técnica (Abraão et al., 2004).

A Cromatografia Circular de Pfeiffer (CCP), criada por Ehrenfried Pfeiffer em 1953, é um método qualitativo e de baixo custo amplamente utilizado para avaliar a vitalidade e a saúde do solo, de compostos e alimentos, especialmente em contextos agroecológicos e biodinâmicos (PFEIFFER, 1984; BEZERRA et al., 2019). Essa técnica tem sido aplicada em diferentes países e sistemas agrícolas, como na avaliação de solos em transição agroecológica no Brasil (Bezerra et al., 2019) e na comparação da qualidade de cultivos na Europa (FRITZ et al., 2020). O procedimento envolve a mistura do solo com solução alcalina e a aplicação em papel de filtro impregnado com nitrato de prata, formando padrões circulares, cromatogramas, que refletem a composição e a integridade do solo. As zonas interna, intermediária e externa do cromatograma correspondem, respectivamente, ao teor mineral, à matéria orgânica e ao húmus, cuja organização e complexidade indicam o grau de saúde do solo (KOKORNACZYK et al., 2016; FOLLADOR, 2015; KHEMANI et al., 2008).

Entretanto, a interpretação dos cromatogramas ainda carece de padronização, o que limita a validação científica do método. Embora Pfeiffer (1984) tenha descrito detalhadamente os padrões visuais associados a solos com diferentes características, análises comparativas posteriores evidenciaram a necessidade de correlação quantitativa com atributos químicos e biológicos (SAAVEDRA et al., 2018). Estudos recentes indicam que a variação das cores e das estruturas radiais nos cromatogramas pode refletir mudanças na matéria orgânica, nutrientes e na microbiota do solo, reforçando seu potencial como bioindicador da qualidade edáfica

(KOKORNACZYK et al., 2016). Apesar dessas evidências promissoras, a ausência de protocolos reprodutíveis e de integração com dados microbiológicos e físico-químicos ainda representa um desafio para consolidar a CCP como ferramenta científica robusta para o monitoramento da saúde do solo.

Estudos tem usado a cromatografia de papel como ferramenta de análise do solo. Ford et al. (2021) avaliaram 343 amostras de solo de diferentes usos da terra no sudoeste da Austrália para investigar a relação entre carbono orgânico total, atividade e diversidade microbiana, níveis de salinidade e pH e 12 características do cromatograma. Esses autores encontraram que embora o carbono orgânico total e a atividade microbiana tenham apresentado as correlações mais fortes com as características do cromatograma, eles não foram associados a um maior desenvolvimento de características radiais e raio mediano da zona, como esperado. Kokornaczyk et al. (2016) observaram forte diferenciação radial e coloração intensa dos padrões parecem ser sinais de boa qualidade do solo, enquanto diferenciação concêntrica e cores borradas indicam um solo infértil. Além disso, a CCP, por ser uma análise de baixo custo e fácil execução, pode substituir parcialmente a análise química do solo, principalmente em casos onde se necessita de uma comparação da fertilidade esperada das amostras de solo, em vez de medições exatas de compostos.

Avaliando qualidade do solo sob diferentes usos no Sudeste MG, Leão et al (2024) observaram que 56 cromatogramas analisados (7 em cada solo amostrado) evidenciaram as diferenças de qualidade do solo nos diferentes usos, onde pastagem, agroflorestas e florestas, indicaram uma melhor aeração do solo e integração harmoniosa entre as frações mineral e orgânica, do que o cultivo do milho. Na Paraíba ao avaliar a qualidade do solo de um agroecossistema de base família, Carneiro e Campos (2021) observaram que a CCP conseguiu diferenciar o melhor manejo do solo indicando que a conservação do solo, pode levar essas áreas a apresentarem melhores condições, ou seja, apresentou os melhores resultados em termos de saúde do solo, uma vez que, expressou alta atividade enzimática.

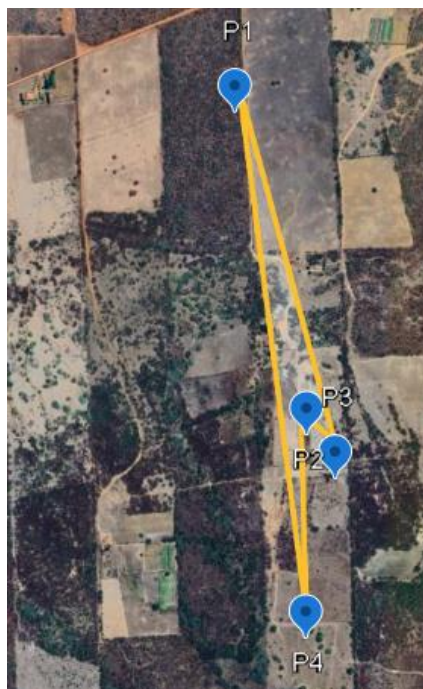
Saavedra et al. (2018) verificou que os cromatogramas foram interpretados, permitindo observar que os três tipos de solo (cultivo convencional, temporario e organico) apresentam as características do sistema de cultivo ao qual pertencem. Reis et al. (2020) por meio da análise dos cromatogramas dos diferentes subsistemas avaliados apontou variâncias entre as unidades avaliadas. De acordo com os semáforos o ecossistema a mata apresentou excelentes condições de saúde e qualidade do solo. Os SAF's obtiveram boa qualidade do solo pela coloração dos semáforos. O cromatograma da área convencional obteve deficiência para a saúde do solo, com coloração vermelha dos semáforos. Coaracy et al. (2019)

observaram que os cromatogramas antes das práticas agroecológicas obtiveram suficiente saúde do solo, já para os cromatogramas dos solos após as práticas agroecológicas houve melhoria para todas as zonas da cromatografia. Assim, todos esses trabalhos indicam que a cromatografia de Pfeiffer foi fundamental para diagnosticar a saúde e propriedades físicas e químicas do solo.

3. Material e métodos

A pesquisa foi realizada em área de agricultura familiar, no município de Upanema no Estado do Rio Grande do Norte, Brasil (Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo BSh, semiárido quente com chuvas de outono e temperaturas médias mensais superiores a 18 °C. Devido às baixas latitudes, a região apresenta duas estações climáticas bem definidas, uma chuvosa e outra seca. A precipitação pluvial média anual é de 715 mm com distribuição unimodal, com 70% dos eventos se concentrando no período de março a maio. A vegetação natural é caracterizada como Caatinga Hiperxerófila, apresentando classes variadas de solos (Lima et al., 2021).

Figura 1. Mapa de localização dos solos usados no estudo.



Foram avaliados agroecossistemas em 4 classes de solo: P1 – Área de Mata Nativa (Latossolo); P2 – Área de Pastagem de Ovinos (Vertissolo); P3 – Área da Horta orgânica (Cambissolo); P4 – Área de Pastagem Nativa (Argissolo), em uma topossequência.

Fonte: (Cunha et al. 2022).

As áreas avaliadas apresentam distintas formas de uso e ocupação do solo, as quais foram classificadas de acordo com suas respectivas classes e coordenadas geográficas, conforme apresentado na Tabela 1 e na Figura 2.

Tabela 1. Localização geográfica das diferentes classes de solos estudadas.

Perfil	Classes de Solo SiBCS/WRB	Coordenadas Geográficas
P1	Latossolo/ Ferralsols	05°36'01" S; 37°22'41" W
P2	Vertissolo/ Vertisols	05°36'23" S; 37°22'36" W
P3	Cambissolo/ Cambisols	05°36'26" S; 37°22'34" W
P4	Argissolo/ Acrisols	05°36'37" S; 37°22'36" W

Fonte: (Cunha et al. 2022).

Figura 2. Uso e ocupação das terras na comunidade rural de Piracicaba/RN.



Fonte: Cunha et al. 2022.

Para a realização das análises físicas e químicas do solo, A classificação dos solos foi realizada de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), proposto pela EMBRAPA, considerando atributos morfológicos, físicos e químicos dos perfis avaliados. foram coletadas amostras com estrutura deformada. As determinações foram conduzidas em laboratório, em triplicata, com posterior cálculo da média das repetições. Os procedimentos analíticos adotados seguiram a metodologia proposta por Teixeira et al. (2017), complementada e adaptada a partir da tese de doutorado de Cunha et al. (2022). Os atributos físicos e químicos do solo dos diferentes agroecossistemas avaliados podem ser observados na Tabela 2 e 3.

Tabela 2. Atributos físicos das classes de solos representativos da Comunidade Piracicaba/RN.

CLASSES DE SOLO		VARIÁVEIS									
SiBCS/WRB	Prof. (m)	Areia (g/kg)	Silte	Arg	DS kg.dm ⁻³	PT cm ³ .cm ⁻³	Mic	Mac	CC	PMP m ³ m ⁻³	DMP mm
P1- Lat/Ferralsols	0,00-0,15	729	43,5	227	1,485	46,5	23	23	0,125	0,095	0,64
	0,15-0,30	638	32	330	1,48	47	30	17	0,18	0,14	0,58
P2- Vert/Vertisols	0,00-0,15	709	74,5	217	1,46	54,5	36	18,5	0,325	0,18	1,365
	0,15-0,30	541	158	301	1,58	51	37	12	0,3	0,22	0,92
P3- Cam/Cambisols	0,00-0,15	698	60	241	1,615	43	25,5	18	0,17	0,1	1,005
	0,15-0,30	594	75	331	1,46	53	40	11	0,27	0,15	0,55
P4 - Arg/Acrisols	0,00-0,15	890	68	41,5	1,55	43,5	16	27	0,055	0,04	0,815
	0,15-0,30	816	67	117	1,62	40	21	19	0,15	0,09	0,6

Nota: SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos; WRB: World reference Base; DS – densidade do solo; PT– porosidade total; Mic – microporosidade; Mac – macroporosidade; CC– capacidade de campo; PMP- ponto de murcha permanente; DMP- diâmetro médio ponderado.

Tabela 3. Atributos químicos das classes de solos representativos da Comunidade Piracicaba/RN.

CLASSES DE SOLO		VARIÁVEIS							
SiBCS/WRB	Profundidade (m)	pH	Ca ²⁺ cmolc/kg	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	P mg/kg	COT g/kg	
P1 - Latossolo/ Ferralsols	0,00-0,15	7,77	3,97	1,3	0,33	0,04	2,02	4,28	
	0,15-0,30	6,21	3,57	1,1	0,17	0,05	1,52	2,47	
P2 - Vertissolo/ Vertisols	0,00-0,15	7,65	16,06	1,9	0,47	0,07	3,38	7,87	
	0,15-0,30	7,94	4,98	2,7	0,12	0,84	2,07	3,94	
P3-Cambissolo/Cambisols	0,00-0,15	6,65	11,3	2,9	0,47	0,09	1,78	7,94	
	0,15-0,30	5,71	16,3	5,4	0,16	0,29	1,96	4,33	
P4 - Argissolo/Acrisols	0,00-0,15	6,54	2,04	0,6	0,40	0,16	2,75	3,56	
	0,15-0,30	5,89	1,69	0,7	0,36	0,19	1,50	2,80	

Nota: SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos; pH – potencial hidrogeniônico; Ca²⁺ – Cálcio; Mg²⁺ – Magnésio; K⁺ – Potássio; Na⁺ – Sódio; P – Fósforo; COT – Carbono Orgânico Total

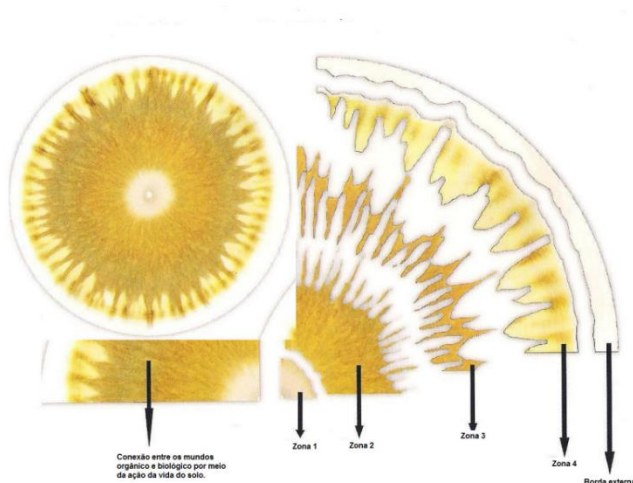
A preparação do cromatograma circular de Pfeiffer envolve etapas cuidadosas que garantem a formação dos padrões circulares representativos das propriedades do solo. Inicialmente, utiliza-se papel de filtro Whatman nº 1 (150 mm de diâmetro), perfurado no centro e acoplado a um pequeno pavio feito do mesmo papel. O papel é previamente impregnado com uma solução reveladora de nitrato de prata (AgNO₃ 0,5%) por capilaridade, permanecendo em contato até a solução alcançar cerca de 4 cm do centro. Em seguida, o papel é retirado e deixado secar em ambiente escuro para evitar a fotodegradação do reagente.

O extrato do solo é preparado misturando 5 g de solo com 50 mL de hidróxido de sódio 1%, permanecendo em repouso por quatro horas, conforme Pfeiffer (1984). Após decantação, o sobrenadante é aplicado sobre o papel tratado com AgNO₃, permitindo que a solução se

espalhe por capilaridade até cerca de 6 cm do centro. O cromatograma é então seco à sombra e exposto à luz difusa por alguns dias, revelando zonas concêntricas que indicam características do solo: a zona central reflete minerais e atividade microbiológica, a intermediária corresponde à matéria orgânica, e a externa representa a dinâmica enzimática e húmica. A leitura é feita visualmente, quantificando diâmetros e padrões de textura conforme Metodologia de Pilon (2018).

Inicialmente, para a interpretação dos cromatogramas, a imagem é dividida em quatro zonas principais. Zona 1: caracteriza a atividade mineral, processos de mineralização, oxigenação e sistema poroso do solo, é indicada coloração bege ou marrom claro; Zona 2: se refere a parte química do solo, se relacionando com a atividade microbiológica (fungos e bactérias), além da textura do solo e propriedades da fração argila; Zona 3: se refere à matéria orgânica do solo, como também, à zona da fauna do solo; Zona 4: se refere ao alimento potencial do solo, disponibilidade do húmus e atividade enzimática/microbiológica. As zonas podem ser observadas na Figura 3.

Figura 3. Exemplo de divisão em zonas no cromatograma:



Fonte: Pinheiro et al. (2017)

Por meio da análise visual, os agricultores podem comparar os cromatogramas à luz de suas vivências e do conhecimento empírico sobre cada agroecossistema. Como cada sistema apresenta características específicas de uso e manejo do solo, os padrões observados na cromatografia como cores, formas e distribuição dos anéis, refletem diferenças associadas à cor da terra, à textura e a outros atributos do solo, permitindo uma interpretação integrada e comparativa entre os distintos agroecossistemas.

Para a avaliação das características de cada cromatograma foi levado em consideração quatro características de importância: integração, que se trata da conexão entre zonas do centro ao fim do cromatograma; plumas, que são vistas como flechas que podem ir desde o centro do cromatograma até terminar em picos mais escuros; picos, que são estruturas pontiagudas que aparecem entre a terceira e quarta zona e apresentam cores escuras; e a cor que ocorre em cada zona, como observado na Figura 4. Através desse padrão de observação, utiliza-se scores para avaliar cada característica visual.

Figura 4. Seleção de cromatogramas exibindo valores mínimos, medianos e máximos em CZ, OZ, canais e picos.

Características visuais de importância		
1. Integração	2. Plumais	Escore
Anéis, concêntricos marcados e homogêneos (ausência de integração)	Ausência ou pluma vestigial	1
Alguns anéis, integração abrupta	Apenas linhas radiais	2
Integração clara de padrões	Linhas radiais a plumas estreitas	3
Integração gradual	Linhas ou plumas radiais que cobrem todo croma	5
Integração difusa e padrões que se entrelaçam	Plumas radiais proeminentes/espessas	5

Características visuais de importância		
2. Picos	3. Cor	Escore
Ausência de picos ligados a plumas	Homogênea; escuro e preto; cores borradas, pouco intensas	1
Pontiagudos	Cinza a marrom	2
Pontiagudos com derivações	Bege	3
Alguns picos que se abrem no fim em manchas	Caro esbranquiçado	4
Picos que se abrem no fim total em manchas	Amarelo, creme; intenso e heterogêneo	5

Fonte: Pilon, 2017.

Fonte: Ford et al (2021)

A avaliação dos cromatogramas foi realizada de forma qualitativa, considerando-se os padrões de cores, formas e organização das zonas, bem como por meio da atribuição de scores às principais características visuais (integração, plumas, picos e coloração). Posteriormente, os scores obtidos foram submetidos à estatística descritiva, com cálculo de médias, a fim de sintetizar o comportamento cromatográfico entre os diferentes usos do solo.

Os atributos físicos e químicos dos solos foram analisados por meio de matriz de correlação de Pearson, análise fatorial e análise de componentes principais (ACP), com o objetivo de compreender, de forma integrada, o comportamento das variáveis dentro de cada sistema de uso do solo, as análises foram realizadas no programa R Studio® statistical packages (R Team, 2022). Essas análises multivariadas permitiram identificar os atributos mais sensíveis

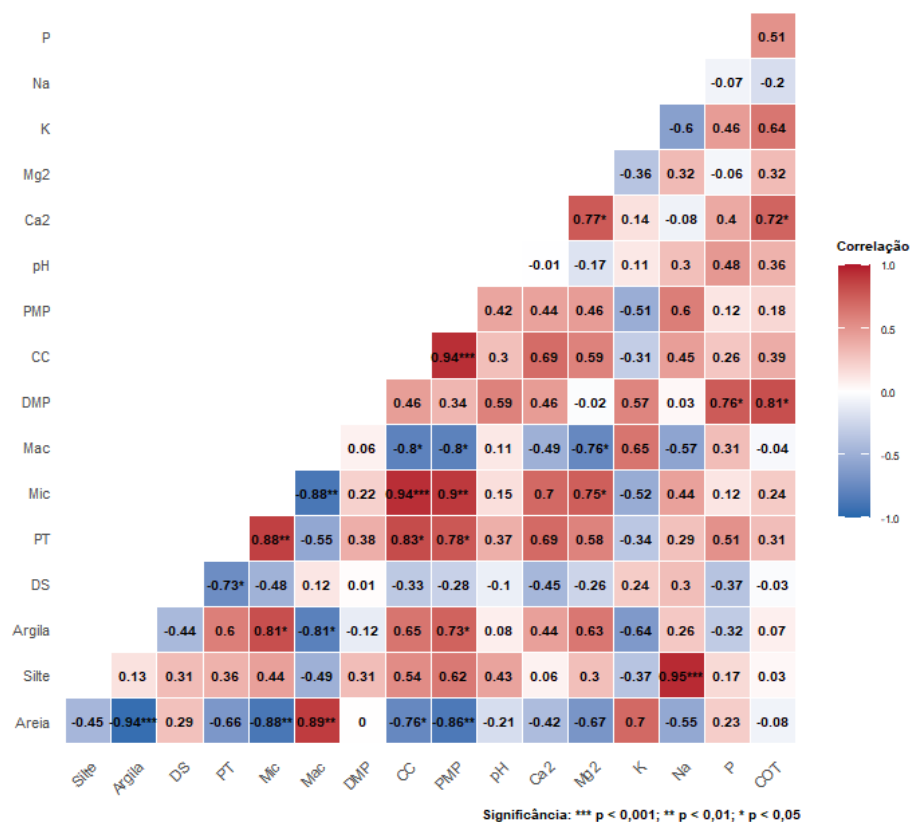
à diferenciação dos agroecossistemas e associar os resultados quantitativos às interpretações qualitativas dos cromatogramas de Pfeiffer, fortalecendo a análise integrada da qualidade do solo.

4. Resultados e discussão

4.1. Matriz de correlação de person

A figura abaixo representa a matriz de correlação com os principais atributos físicos e químicos estudados. Por meio dela observa-se altas correlações positivas entre porosidade total e argila com a microporosidade. Areia com macroporosidade. Microporosidade com capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) e os nutrientes magnésio (Mg²⁺) e cálcio (Ca²⁺), bem como diâmetro médio ponderado (DMP) com fósforo (P) e carbono orgânico total (COT) e silte com o sódio (Na⁺).

Figura 5. Matriz de correlação entre as variáveis físicas e químicas de classes de solo em usos da terra, Piracicaba, Upanema-RN.



A matriz de correlação de Pearson evidenciou inter-relações consistentes entre os atributos físicos e químicos do solo, refletindo a influência conjunta da textura, da estrutura e do carbono orgânico total sobre a funcionalidade dos agroecossistemas avaliados. As

correlações positivas observadas entre a fração argila, a microporosidade e a porosidade total confirmam o papel da textura fina na organização do espaço poroso, favorecendo a retenção de água no solo, especialmente em ambientes semiáridos, onde esse atributo é determinante para a sustentabilidade produtiva em função da escassez hídrica (Ribeiro et al., 2007; Teixeira et al., 2017).

A correlação positiva entre microporosidade, capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) reforça a dependência direta do armazenamento de água em relação à distribuição dos poros, sobretudo microporos. Solos com maior proporção de microporos tendem a reter maiores volumes de água, ainda que parte dessa água não esteja totalmente disponível às plantas, o que explica a correlação simultânea com CC e PMP (Teixeira et al., 2017). Esse comportamento é típico de solos mais argilosos ou com maior aporte de matéria orgânica, como observado nas áreas de pastagem de ovinos (PO), horta orgânica (HO) e mata nativa (MN).

As correlações positivas entre areia e macroporosidade indicam a predominância macroporos em solos de textura mais grossa, os quais favorecem a drenagem e a aeração, porém reduzem a retenção de água. Esse padrão é recorrente em Argissolos sob pastagem nativa (PN), caracterizados por maiores teores de areia na camada superficial, conforme descrito por Ribeiro et al. (2007). Em contrapartida, a menor associação da areia com atributos hídricos evidencia a limitação desses solos quanto à disponibilidade de água, aspecto crítico em regiões semiáridas. O diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) apresentou correlação positiva com o fósforo (P) e com o carbono orgânico total (COT), indicando que solos com maior teor de matéria orgânica tendem a apresentar agregados mais estáveis. A matéria orgânica atua como agente cimentante, promovendo a formação e a estabilização dos agregados, além de proteger o carbono da decomposição rápida (Six et al., 2000; Reichert et al., 2016; Wiesmeier et al., 2019). Esse comportamento é particularmente evidente na área de horta orgânica (HO), onde o histórico de adubação orgânica contribui para o aumento do COT e, conseqüentemente, para a melhoria da estrutura do solo.

4.2. Análise fatorial

A análise fatorial permitiu sintetizar a complexidade dos dados em três fatores principais, que explicaram conjuntamente 83,59% da variabilidade total, valor considerado elevado para estudos ambientais, indicando boa representatividade das variáveis selecionadas (Abdi & Williams, 2010). O primeiro fator (F1), responsável por 46,72% da variância, agregou atributos físicos relacionados à estrutura e ao armazenamento de água no solo, como porosidade total,

microporosidade, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e argila, além de associações positivas com Ca^{2+} e Mg^{2+} . Esse fator representa um gradiente de qualidade estrutural associado à presença de matéria orgânica e à fração fina do solo, corroborando a importância desses atributos para a funcionalidade do solo (Six et al., 2000; Lal, 2020).

O segundo fator (F2), com 22,64% da variância explicada, destacou atributos químicos e estruturais sensíveis ao manejo, como DMP, COT, fósforo, potássio e pH, além de relações negativas com alguns atributos físicos. Esse fator evidencia o efeito do uso e manejo do solo sobre a estabilidade estrutural e a fertilidade química, diferenciando áreas com maior intervenção antrópica, como pastagens, daquelas com manejo conservacionista ou aporte contínuo de resíduos orgânicos, como a horta orgânica (Lal, 2020).

O terceiro fator (F3), embora com menor contribuição (14,22%), reuniu variáveis associadas à fração silte, densidade do solo e sódio, indicando processos ligados à compactação e à dinâmica de partículas intermediárias. A associação do Na^+ com esse fator sugere possíveis influências da salinidade ou sodicidade, comuns em ambientes semiáridos, que podem afetar negativamente a estrutura do solo e a estabilidade dos agregados (Reichert et al., 2007).

Tabela 4. Análise fatorial da variância dos dados.

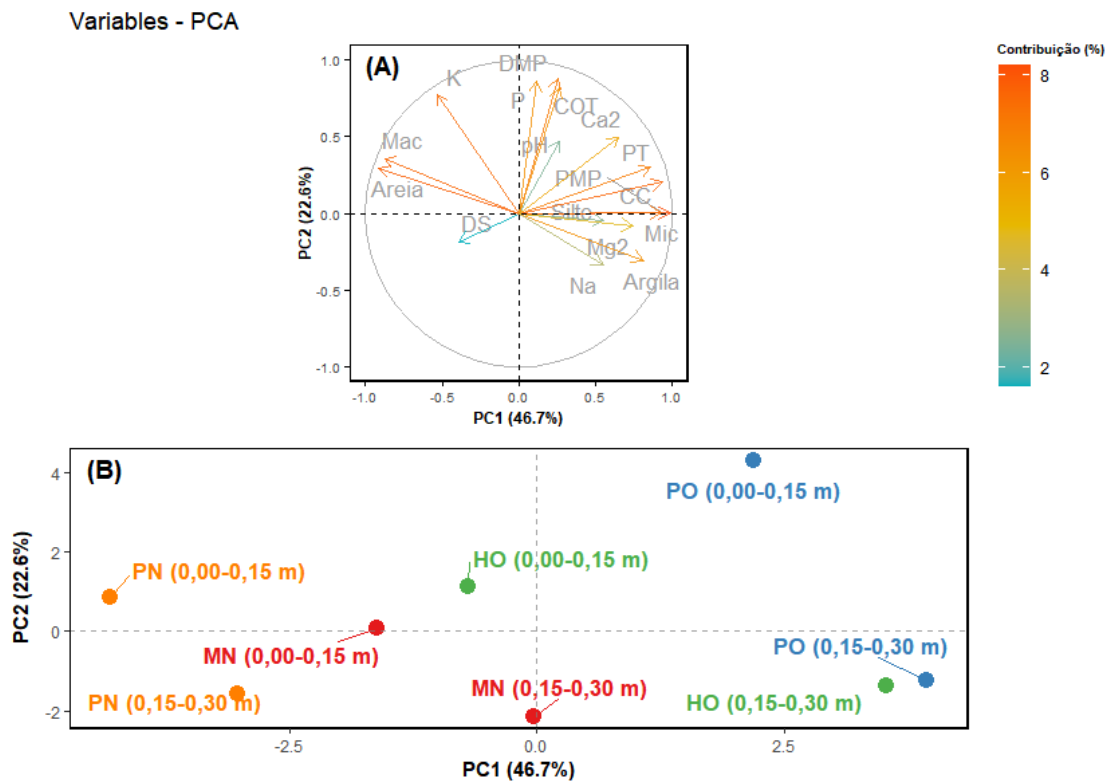
Variáveis	F1	F2	F3
Areia	-0.32	-0.15	-0.01
Silte	0.2	0.02	-0.5
Argila	0.29	0.16	0.2
DS	-0.14	0.1	-0.4
PT	0.3	-0.15	0.09
Mic	0.35	0	0.09
Mac	-0.31	-0.18	-0.03
DMP	0.09	-0.45	-0.2
CC	0.33	-0.1	-0.04
PMP	0.33	0	-0.14
pH	0.09	-0.24	-0.34
Ca^{2+}	0.23	-0.25	0.29
Mg^{2+}	0.26	0.04	0.2

K ⁺	-0.19	-0.4	0.03
Na ⁺	0.19	0.17	-0.47
P	0.04	-0.44	-0.08
COT	0.09	-0.42	0.06
Autovalores	7.94	3.85	2.42
Variância Total (%)	46.72	22.64	14.22
Variância Total Acumulada (%)	46.72	69.37	83.59

4.3. Análise de componentes principais

A análise de componentes principais (ACP) (Figura 6) discriminou os atributos do solo e usos da terra, onde as componentes 1 e 2 contribuíram com a explicação de 69,3% dos resultados obtidos. Os atributos com maior capacidade de explicabilidade encontram-se com vetores próximos aos círculos de correlação e nuvens de variáveis. As variáveis Potássio, macroporosidade e areia discriminaram a área de PN e HO na camada de 0,00-0,15 m, enquanto a densidade do solo nas áreas MN e PN nas camadas 0,00-0,15 e 0,15-0,30 m. As variáveis DMP, pH, COT, P, Ca²⁺, PMP, PT e Silte, distinguiram as áreas PO e HO na camada 0,00-0,15 m, enquanto microporosidade, argila, Na⁺ e Mg²⁺ HO, MN e PO em subsuperfície.

Figura 6. Componentes principais entre as principais variáveis físicas e químicas dos solos e os usos da terra, Piracicaba, Upanema-RN.



As relações estabelecidas entre a macroporosidade e areia são justificadas em função da presença de poros maiores presentes na fração areia, haja vista alta macroporosidade, baixa microporosidade e por consequência menor porosidade total, quando comparado a fração argila (Ribeiro et al., 2007; Brady, 2013). As maiores densidades do solo em MN e PN são advindas da própria classe de solo, como Latossolos e Argissolos que apresentam minerais densos em sua composição, principalmente na camada superficial arenosa (Ker, 1997).

Em relação a variáveis Diâmetro médio ponderado (DMP), Carbono orgânico total (COT) e porosidade total (PT) foram destaque nas áreas de horta, sabemos que essas áreas apresentam histórico proeminente de adubação orgânica, o que reflete na elevação do carbono do solo, melhora a agregação e a porosidade total, de maneira geral cria melhores condições para a qualidade física e estrutural do solo, como bem mencionado por xxxxx....

A análise de componentes principais (ACP) complementou a análise fatorial ao permitir a visualização espacial da separação entre usos da terra e classes de solo. As duas primeiras componentes explicaram 69,3% da variabilidade total, valor satisfatório para discriminar padrões edáficos (Abdi & Williams, 2010). Observou-se clara distinção entre os agroecossistemas, com a área de horta orgânica (HO) associada a vetores de COT, DMP, porosidade total, capacidade de campo e fósforo, refletindo a melhoria simultânea dos atributos

físicos e químicos decorrente do manejo orgânico. Esses resultados corroboram estudos que destacam o papel do carbono orgânico na melhoria da estrutura, da retenção de água e da fertilidade do solo (Six et al., 2000; Wiesmeier et al., 2019; Lal, 2020).

A mata nativa (MN), representada pelo Latossolo, apresentou associação com maior densidade do solo e atributos estruturais intrínsecos à classe pedológica, evidenciando que, apesar da ausência de manejo agrícola, a estrutura do solo é fortemente condicionada pela mineralogia e pela textura, especialmente em solos altamente intemperizados (Ker, 1997; Ribeiro et al., 2007). Ainda assim, a presença de cobertura vegetal contínua contribui para a manutenção do carbono orgânico e da estabilidade estrutural.

A área de pastagem nativa (PN), apresentou associação com areia, macroporosidade e potássio, principalmente na camada superficial, indicando maior influência da predominância da fração areia e menor retenção hídrica. Esses resultados sugerem maior vulnerabilidade estrutural e menor capacidade de armazenamento de água, o que pode comprometer a resiliência desse sistema em condições de déficit hídrico prolongado, típicas do semiárido (Ribeiro et al., 2007; Teixeira et al., 2017).

No caso da área de pastagem de ovinos (PO), desenvolvida sobre Vertissolo, observa-se clara associação com os atributos hídricos do solo, principalmente na camada superficial (0,00–0,15 m). As variáveis capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade total (PT), microporosidade (Mic), além de COT, Ca^{2+} e pH, apresentaram vetores próximos à PO, indicando forte influência dessas propriedades na discriminação dessa área. Essa associação é coerente com as características intrínsecas dos Vertissolos, que apresentam elevados teores de argilas de alta atividade coloidal, conferindo maior capacidade de retenção de água, maior expansão e contração e predominância de microporos (Teixeira et al., 2017; Ribeiro et al., 2007).

Entretanto, a posição da PO distante do vetor de macroporosidade no gráfico indica baixa proporção de macroporos, condição que compromete a infiltração da água no solo e reduz a aeração, o que favorece o escoamento superficial durante eventos de chuvas intensas e, consequentemente, a suscetibilidade à erosão. Essa interpretação é corroborada pelas condições observadas em campo, onde a área de PO apresentava-se degradada, com ocorrência de voçorocas, elevado comprimento das feições erosivas e declividade acentuada, evidenciando processos avançados de degradação física do solo.

A elevada retenção hídrica, expressa pela associação com os atributos CC e PMP, reflete a atuação das argilas expansivas típicas dessa classe de solo, que, embora favoreçam o

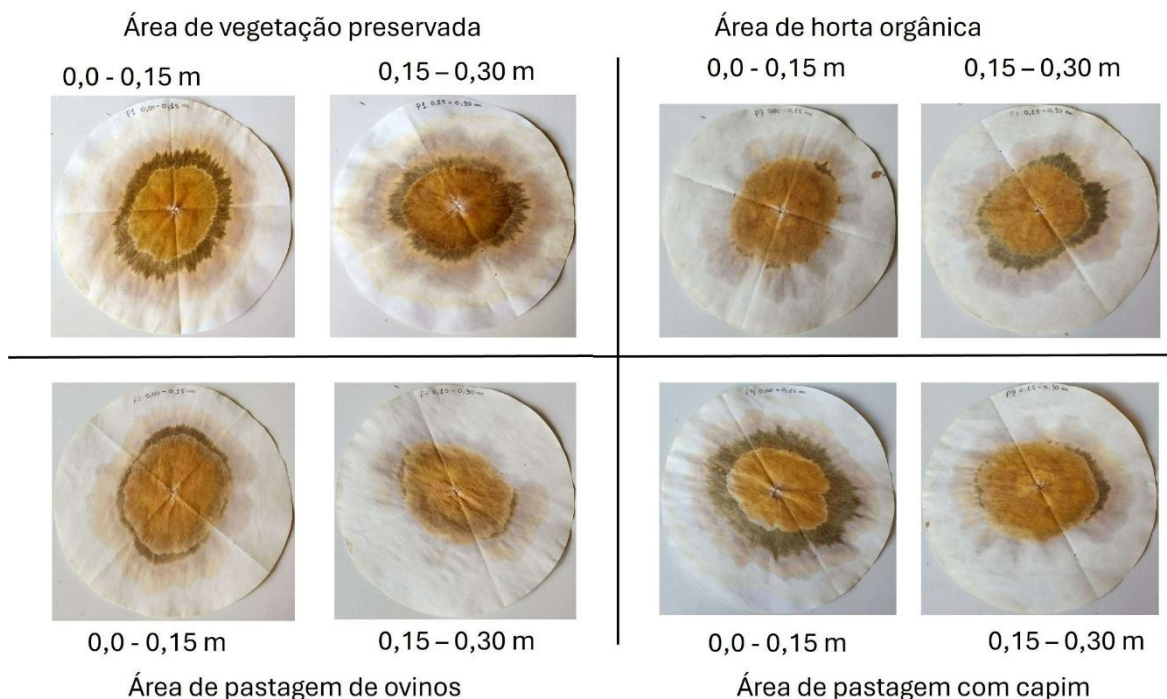
armazenamento de água, podem limitar a aeração, a percolação e o desenvolvimento radicular quando associadas à compactação e ao manejo inadequado (Reichert et al., 2016). Além disso, a associação da PO com COT, DMP e bases trocáveis, especialmente Ca^{2+} , sugere que a mineralogia da fração argila contribui para certa estabilidade estrutural; contudo, essa estabilidade não foi suficiente para conter os processos erosivos frente à baixa macroporosidade e às condições de uso e relevo da área (Six et al., 2004; Lal, 2020).

4.4. Cromatografia de Pfeiffer

A interpretação dos cromatogramas de Pfeiffer evidenciou diferenças entre os agroecossistemas avaliados, bem como variações entre as camadas de profundidade do solo (Figura 7). Esses padrões cromatográficos refletem, de forma integrada, as condições físicas, químicas e biológicas dos solos, corroborando os resultados obtidos nas análises quantitativas.

De modo geral, os cromatogramas apresentaram variações quanto ao grau de integração entre as zonas, intensidade e continuidade das plumas, definição dos picos e coloração predominante. Segundo Pfeiffer (1984) e Kokornaczyk et al. (2016), cromatogramas com zonas bem definidas, plumas radiais contínuas e coloração homogênea indicam solos com maior vitalidade biológica, melhor equilíbrio químico e estrutura física mais estável.

Figura 7. Cromatogramas circular de Pfeiffer de agroecossistemas com diferentes formas de uso do solo.



Fonte: Autor (2025)

Com relação a área de vegetação preservada os cromatogramas apresentaram elevado grau de integração entre as zonas, com transições suaves do centro para a periferia, plumas bem formadas e picos definidos na interface entre a terceira e a quarta zonas. A coloração predominante em tons de marrom-dourado indica equilíbrio entre frações minerais, matéria orgânica e húmus estável.

Esses padrões estão diretamente associados aos atributos físicos observados nesse solo, como densidade intermediária, porosidade total equilibrada e adequada relação entre macro e microporos, favorecendo a aeração e a retenção de água. Quimicamente, os teores moderados de bases trocáveis e carbono orgânico total, aliados ao pH próximo da neutralidade na camada superficial, sustentam uma atividade biológica contínua, refletida nos cromatogramas bem estruturados, como observado na tabela 2 deste trabalho. Esses resultados confirmam a condição da mata nativa como referência de qualidade edáfica, conforme relatado por Reis et al. (2020) e Leão et al. (2024).

Os cromatogramas da área de pastagem de ovinos apresentaram zonas visíveis, porém com menor integração radial, plumas menos contínuas e picos de menor extensão. Observou-se maior concentração de coloração na região central, característica associada à elevada atividade mineral e à dinâmica específica de Vertissolos.

Fisicamente, esse solo apresenta alta microporosidade e elevada capacidade de retenção de água, evidenciada pelos altos valores de capacidade de campo e ponto de murcha

permanente, o que pode limitar a aeração do solo em determinados períodos. Quimicamente, os elevados teores de cálcio, magnésio e pH alcalino contribuem para a fertilidade natural do solo, porém a menor expressão da zona externa do cromatograma sugere uma atividade biológica condicionada, possivelmente influenciada pelo manejo da pastagem e pelas características expansivas da argila. Esses padrões corroboram observações de Ford et al. (2021), que destacam limitações da CCP em solos com elevada atividade mineral.

Na área de horta orgânica, os cromatogramas evidenciaram zonas bem delimitadas e plumas intensas, especialmente na camada superficial, indicando elevada atividade biológica e forte interação entre matéria orgânica e fração mineral. A coloração mais escura e homogênea na zona intermediária reforça a presença e a qualidade da matéria orgânica do solo.

Esses padrões cromatográficos são coerentes com os elevados valores de carbono orgânico total, cálcio e magnésio observados nas análises químicas, bem como com os maiores valores de porosidade total, microporosidade e diâmetro médio ponderado, que indicam boa estabilidade estrutural. O manejo orgânico adotado nessa área, com aporte frequente de resíduos orgânicos, contribui para a melhoria da agregação do solo, o que se reflete tanto nos atributos físicos quanto na organização visual dos cromatogramas. Resultados semelhantes foram observados por Carneiro e Campos (2021) e Coaracy et al. (2019) em sistemas agroecológicos.

Os cromatogramas da área de pastagem com capim apresentaram menor definição das zonas, plumas curtas ou fragmentadas e coloração mais clara e irregular, especialmente na zona externa. Esses padrões indicam menor integração entre as frações do solo e reduzida atividade biológica.

Tais características estão associadas à predominância da fração areia, menores valores de microporosidade, capacidade de campo e carbono orgânico total, além de menor estabilidade de agregados, conforme evidenciado pelos valores reduzidos de diâmetro médio ponderado. Quimicamente, os menores teores de bases trocáveis e matéria orgânica reforçam a interpretação de um solo com menor fertilidade natural e maior susceptibilidade à degradação estrutural. Segundo Kokornaczyk et al. (2016), cromatogramas com baixa integração e cores pouco intensas são típicos de solos com menor vitalidade edáfica.

De forma integrada, os padrões observados nos cromatogramas acompanharam os gradientes identificados nas análises físicas e químicas do solo, conforme evidenciado pelos scores atribuídos às características visuais dos cromatogramas (integração, plumas, picos e coloração) apresentados na Tabela 5. Esses scores permitiram discriminar os agroecossistemas avaliados, refletindo diferenças nas condições estruturais, químicas e biológicas de cada classe de solo.

Tabela 5. Avaliação qualitativa da qualidade do solo por meio dos scores das características visuais dos cromatogramas circulares de Pfeiffer em diferentes agroecossistemas.

Cromatograma	Integração	Plumas	Picos	Cor	Nota final	Média
P1 0,00-0,15 m (Latossolo)	5	5	4	5	19	4,75
P1 0,15-0,30 m (Latossolo)	5	5	4	5	18	4,5
P2 0-00-0,15 m (Vertissolo)	2	1	1	3	7	1,75
P2 0,15-0,30 m (Vertissolo)	1	1	1	3	6	1,5
P3 0,00-0,30 m (Cambissolo)	2	2	2	4	10	2,5
P3 0,15-0,30 m (Cambissolo)	3	5	5	4	17	4,25
P4 0,00-0,15 m (Argissolo)	5	5	4	5	19	4,75
P4 0,15-0,30 m (Argissolo)	3	3	2	4	12	3

As áreas que apresentaram maiores scores médios na Tabela 5, especialmente para os atributos integração e desenvolvimento de plumas, corresponderam aos solos com maiores teores de carbono orgânico total, maior estabilidade de agregados (DMP), maior porosidade total e melhor equilíbrio entre macro e microporos, como observado na área de vegetação preservada e na horta orgânica. Esses resultados indicam maior funcionalidade edáfica e atividade biológica, expressas por cromatogramas mais organizados, com picos bem definidos e coloração homogênea.

Em contraste, os agroecossistemas que apresentaram menores scores cromatográficos na Tabela 5, sobretudo para integração e plumas, estiveram associados a solos com menor teor de matéria orgânica, menor capacidade de retenção de água e limitações estruturais, destacando-se as áreas de pastagem, especialmente no Argissolo. Nesses casos, os cromatogramas exibiram menor definição das zonas, plumas curtas ou fragmentadas e coloração menos intensa, indicando menor vitalidade biológica do solo.

Dessa forma, os scores apresentados na Tabela 5 demonstram coerência com os atributos físicos e químicos avaliados, reforçando que a Cromatografia Circular de Pfeiffer é capaz de sintetizar, de maneira qualitativa e comparativa, a condição do solo sob diferentes usos da terra. Esses resultados confirmam o potencial da CCP como ferramenta complementar às análises laboratoriais convencionais, particularmente em sistemas de agricultura familiar e agroecológicos.

5. Conclusão

A Cromatografia Circular de Pfeiffer demonstrou elevada capacidade de discriminar a qualidade do solo entre diferentes usos da terra e classes pedológicas, apresentando forte concordância com os atributos físicos e químicos analisados. Os cromatogramas refletiram as

variações na textura, estrutura, teor de carbono orgânico total e fertilidade química, sendo mais integrados e biologicamente expressivos em áreas sob mata nativa e manejo orgânico. Em contraste, solos sob pastagem, especialmente em Argissolos, apresentaram padrões menos organizados, condizentes com suas limitações estruturais e menor teor de matéria orgânica. Dessa forma, a Cromatografia Circular de Pfeiffer mostrou-se uma ferramenta qualitativa eficiente, de baixo custo e com elevado potencial para diagnóstico participativo da qualidade do solo, especialmente quando utilizada de forma integrada às análises laboratoriais convencionais.

6. Referências

- CARNEIRO, A. M.; CAMPOS, J. O. The use of Pfeiffer chromatography as a tool for evaluating agroecological management in an agricultural property in the municipality of Boqueirão–PB. *International Journal Semiarid*, v. 4, n. 4, 2021.
- DA CRUZ, S. N. et al. Qualidade do solo estimada por técnicas de baixo custo: cromatografia de Pfeiffer como ferramenta de avaliação agrícola e ambiental de solos na agricultura familiar. *Revista Valore*, v. 8, p. 85–102, 2023.
- DOMINGUES, S.; BOFF, P.; BOFF, M. I. C. Pfeiffer's circular chromatography in soil treated with high dynamized dilutions. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, v. 13, n. 7, p. 1183–1194, 2022.
- DOS REIS, E. F.; DE MELO, D. M. A. Qualidade do solo através da cromatografia de Pfeiffer em subsistemas experimentais com diferentes usos. *Cadernos de Agroecologia*, v. 15, n. 2, 2020.
- FORD, B.; COOK, B.; TUNBRIDGE, D.; TILBROOK, P. Using paper chromatography for assessing soil health in south western Australia. Albany: Centre of Excellence in Natural Resource Management, University of Western Australia, 2019.
- FORD, B. M.; STEWART, B. A.; TUNBRIDGE, D. J.; TILBROOK, P. Paper chromatography: an inconsistent tool for assessing soil health. *Geoderma*, v. 383, p. 114783, 2021.
- GRACIANO, I.; MATSUMOTO, L. S.; DEMÉTRIO, G. B.; PEIXOTO, E. M. Evaluating Pfeiffer chromatography for its validation as an indicator of soil quality. *Journal of Agricultural Studies*, v. 8, n. 3, p. 420–446, 2020.
- HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, A. et al. Patterns for estimating soil fertility using Pfeiffer's chromatography technique. *Terra Latinoamericana*, v. 39, 2021.
- LEÃO, A.; PEREIRA, N.; FERRARI, L.; MARTINS, B. Cromatografia de Pfeiffer para avaliação da qualidade do solo sob diferentes usos no IF Sudeste MG – Campus Rio Pomba. *Cadernos de Agroecologia*, v. 19, n. 1, 2024.
- MACCHIOLI-GRANDE, M. et al. Solute generation and transport in semiarid mountain catchments of the Central Chilean Andes. *Earth Systems and Environment*, p. 1–20, 2025.

MEDINA SAAVEDRA, T.; ARROYO FIGUEROA, G.; PEÑA CABALLERO, V. Chromatography of Pfeiffer in the analysis of soils of productive systems. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, v. 9, n. 3, p. 665–673, 2018.

ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. *WIREs Computational Statistics*, [s. l.], vol. 2, no 4, p. 433–459, 2010. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wics.101>. Acesso em: 16 dez. 2025.

ANTUNES, M. C.; CAMPOS, T. M. P. de; JÚNIOR, J. T. A. Soil carbon storage and retention: a critical synthesis on concepts, research opportunities and sustainable application in environmental engineering. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, [s. l.], vol. 60, p. e2704–e2704, 2025. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/2704. Acesso em: 16 dez. 2025.

DONAGEMMA, G. K. et al. Manual de métodos de análise de solo. [s. l.], 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Oswaldo-Vischi-Filho/post/Determination_of_the_soil_texture_based_on_the_permanent_wilting_point_of_both_horizons_subsoil_and_topsoil/attachment/59d6356779197b8077992fb2/AS%3A384089392730114%401468585456111/download/Manual+de+Metodos+de+Analise+de+Solo+Brasil.pdf. Acesso em: 1 abr. 2025.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L.; REINERT, D. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tópicos em ciência do solo*, [s. l.], vol. 5, 2007.

SIX, J. et al. Soil Structure and Organic Matter I. Distribution of Aggregate-Size Classes and Aggregate-Associated Carbon. *Soil Science Society of America Journal*, [s. l.], vol. 64, no 2, p. 681–689, 2000. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2000.642681x>. Acesso em: 16 dez. 2025.

SOLOS DO NORDESTE. - PORTAL EMBRAPA. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1003864/solos-do-nordeste>. Acesso em: 16 dez. 2025.

WIESMEIER, M. et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, [s. l.], vol. 333, p. 149–162, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706117319845>. Acesso em: 16 dez. 2025.

MARQUES, F. A. et al. Caracterização e classificação de Cambissolos do arquipélago de Fernando de Noronha, Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 1023-1034, 2007. DOI:10.1590/S0100-06832007000500019.

SANTOS, H. G. dos; et al. *Proposta de atualização da terceira edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos: ano 2017*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 159 p

PILON, A. L. *Cromatografia de Pfeiffer: fundamentos e aplicações*. 2018.

MELO, D. M. A.; REIS, E. F.; SILVA, A. F.; et al. Qualidade do solo avaliada por meio da cromatografia de Pfeiffer em diferentes sistemas de uso da terra. *Cadernos de Agroecologia*, v. 14, n. 1, 2019.

FELICIANO, R. F. Avaliação da qualidade do solo por meio da cromatografia circular de Pfeiffer em sistemas de manejo agroecológico. 2018. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) – Instituição de Ensino, Local, 2018.

KOKORNACZYK, T.; PARPINELLO, G. P.; VERSARI, A.; GALASSI, S. Assessment of soil fertility using Pfeiffer chromatography. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, v. 89, p. 168–175, 2016.