



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Análise Multivariada de Atributos Físicos e Químicos de Solos do Semiárido da Paraíba

Madson Tavares Silva¹, Antônia Silânia de Andrade², Santana Livia de Lima³, André Bezerra Oliveira⁴
Welinagila Grangeiro de Sousa⁵, Pedro Fernandes de Souza Neto⁶

¹Professor Doutor, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, CEP: 58109-970; Campina Grande-(PB), Brasil, madson.tavares@professor.ufcg.edu.br, <https://orcid.org/0000-0003-1823-2742>.

²Doutora em Meteorologia pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, CEP: 58109-970; Campina Grande - (PB), Brasil, silaniaandrade21@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9333-8251>.

³Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, CEP: 58109-970; Campina Grande - (PB), Brasil, santana.livia@estudante.ufcg.edu.br, <https://orcid.org/0000-0001-7873-4299>.

⁴Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, CEP: 58109-970; Campina Grande - (PB), Brasil, andrebezerraoliveira@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2769-2727>

⁵Pesquisadora PCI do Instituto Nacional do Semiárido - INSA, CEP: 58434-700 Campina Grande -PB, Brasil, welinagila.sousa@insa.gov.br, <https://orcid.org/0000-0002-5161-6345>

⁶Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, CEP: 58109-970; Campina Grande - (PB), Brasil, piurosfernandes@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3537-7898>.

Artigo recebido em 11/10/2024 e aceito em 08/09/2025

RESUMO

A região do Semiárido Nordeste é composta majoritariamente por Neossolos Litólicos e Luvisolos, solos rasos e pedregosos com limitações à infiltração de água e à agricultura. Este estudo avaliou os atributos físicos e químicos de 40 amostras de solo da microrregião do Cariri Oriental (PB), utilizando estatística descritiva e análise fatorial para determinar um Índice de Produtividade do Solo (IPS). As análises multivariadas foram realizadas no software QGIS 3.34, com interpolação por Inverse Distance Weighted (IDW). A porosidade se destacou como atributo influenciado pela textura e estrutura do solo. A análise dendrograma mostrou diferenciação clara entre os grupos de solo com base nos atributos analisados, sem variação interna na área estudada. O IPS permite uma avaliação integrada da qualidade do solo, sendo essencial considerar a classificação pedológica e climática para interpretar os resultados. Mapas temáticos dos atributos M.O, N, P e K e físicos foram gerados, observando-se que a interpolação suaviza a distribuição dos dados.

Palavras chaves: Pedologia, geoestatística, cariri ocidental.

Multivariate Analysis of Physical and Chemical Attributes of Soils in the Semi-Arid Region of Paraíba

ABSTRACT

The Northeastern Semi-Arid region is predominantly composed of Litholic Neosols and Luvisols, which are shallow, stony soils with limitations in water infiltration and agricultural use. This study evaluated the physical and chemical attributes of 40 soil samples from the Eastern Cariri microregion (Paraíba), using descriptive statistics and factor analysis to determine a Soil Productivity Index (SPI). Multivariate analyses were performed using QGIS 3.34 software, applying the Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation method. Porosity emerged as a key attribute influenced by soil texture and structure. Dendrogram analysis revealed clear differentiation among soil groups based on the evaluated attributes, with no internal variation within the study area. The SPI enables an integrated assessment of soil quality, with soil classification and climate conditions being essential for interpreting the results. Thematic maps of the chemical (organic matter, N, P, and K) and physical attributes were generated, showing that interpolation smooths the data distribution.

Keywords: Pedology, geostatistics, Eastern Cariri.

Introdução

O solo é um recurso natural fundamental para os ecossistemas e a produção agrícola, sendo caracterizado por alta complexidade física, química e biológica. A compreensão de suas propriedades, especialmente os atributos físico-químicos, é essencial para o manejo sustentável, o aumento da produtividade das culturas e a conservação ambiental (Savioli et al., 2024). A análise detalhada desses atributos permite identificar áreas com potencial produtivo, zonas de manejo específico e regiões susceptíveis à degradação, como compactação e contaminação por metais pesados (Feitosa et al., 2019; Rocha et al., 2024).

Mesmo existindo informações acerca dos solos na região semiárida, como os levantamentos exploratórios e outros estudos dessa temática é sempre válido a realização de pesquisas sobre características dos diferentes solos representativos em uma escala mais detalhada (Mota e Valladares, 2011; Boechat et al., 2020). Estudos de caracterização de solos em regiões ainda pouco exploradas, além de disponibilizarem informações mais precisas sobre diversas classes de solos ao longo do território nacional, permitem sistematizar informações sobre as propriedades dos solos, que poderão servir de subsídio para o desenvolvimento de práticas de manejo e uso sustentável (Almeida et al., 2016).

Vários fatores que condicionam o movimento da água no solo têm sido estudados, como a matéria orgânica, selamento superficial e umidade inicial (Guimarães et al., 2013; Klinken & Pereira, 2023). Outros elementos de relevância no estudo da infiltração são o manejo, a porosidade, a densidade e a variabilidade espacial do solo (Embrapa, 2018). A caracterização e o maior entendimento destas dependências tornam-se fundamentais para permitir um melhor entendimento dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos solos (Fiorin, 2008; Tavares et al., 2020).

Com os avanços tecnológicos e o aumento da disponibilidade de dados ambientais, técnicas estatísticas multivariadas têm sido amplamente utilizadas para investigar a variabilidade espacial e as interações entre os atributos do solo. Dentre essas técnicas, a análise fatorial (AF) e a análise de agrupamento hierárquico destacam-se por sua capacidade de reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar padrões ocultos, sem comprometer a integridade das informações originais (Rogers, 2022; Oliveira & Dolci, 2023).

Yokomizo et al. (2020) citam que o caráter multivariado dos dados oriundos de estudo nas ciências biológicas, ecológicas, agrônomicas e muitos outros tipos, associados ao desenvolvimento contínuo da tecnologia computacional, tem levado ao crescente interesse no uso de métodos multivariados. Além disso, a análise multivariada (AM) considera a dependência entre as variáveis-respostas (covariância), fato que na análise univariada não é considerado. Os autores ainda ressaltam que o uso de apenas uma variável pode ser uma simplificação perigosa, não expondo de forma adequada as verdadeiras causas de variações específicas aos dados do estudo, e deixando fora da análise a importante informação de covariabilidade entre as variáveis.

De acordo com Hair Jr. et al. (2006), a AM refere-se a todas as técnicas estatísticas que analisem simultaneamente várias medições em indivíduos ou objetos que estejam sob investigação. Assim a AM pode ser considerada como qualquer análise simultânea de mais de duas variáveis. Dessa forma, alguns estudos como os de (Santi et al., 2012; Silva et al., 2015; Tavares et al., 2019) têm aplicado técnicas multivariadas para avaliação das variáveis do solo e encontrado resultados satisfatórios. Assim, o entendimento do comportamento dos atributos do solo permite o estabelecimento de práticas adequadas de manejo do solo.

Os métodos multivariados são escolhidos de acordo com os objetivos da pesquisa. Quando o interesse é verificar como as amostras se relacionam, ou seja, o quanto estas são semelhantes, destacam-se dois métodos: análise fatorial e a análise de agrupamento hierárquico (Castilho et al., 2017).

A AF, por exemplo, transforma variáveis correlacionadas em componentes independentes que explicam a maior parte da variabilidade dos dados, permitindo a identificação de fatores latentes relacionados à litologia, ao uso da terra e a processos pedogenéticos (Clementino et al., 2024). Já a análise de agrupamento possibilita a classificação de amostras com características semelhantes, contribuindo para a definição de zonas homogêneas de solo com base em critérios técnicos e agrônomicos (Costa et al., 2020).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo caracterizar os atributos físicos e químicos do solo por meio da estatística descritiva e aplicar técnicas multivariadas, como a análise fatorial e a análise de agrupamento, a fim de identificar fatores latentes relacionados à qualidade

do solo e delimitar padrões espaciais homogêneos. Espera-se que os resultados subsidiem estratégias de uso e manejo sustentável dos solos na região estudada.

Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo está situada na microrregião do Cariri Oriental, na Paraíba, composta por 12 municípios. Com 4.219,15 km² e cerca de 63.704 habitantes, a região apresenta clima BSh (semiárido quente), segundo Köppen,

caracterizado por chuvas escassas (média anual de 500 mm) e estação seca de até 11 meses (IBGE, 2010). O município de Cabaceiras apresenta índices pluviométricos inferiores a 300 mm. As médias de temperatura são superiores a 24° C e a umidade relativa do ar inferior a 75%. Apresenta os mais baixos índices pluviométricos do Estado. A esta limitação climática, associam-se fortes limitações edáficas (solos salinos, rasos e pedregosos) que influenciam substancialmente a atividade agrícola com repercussões na ocupação do espaço regional (Rozendo et al., 2015).

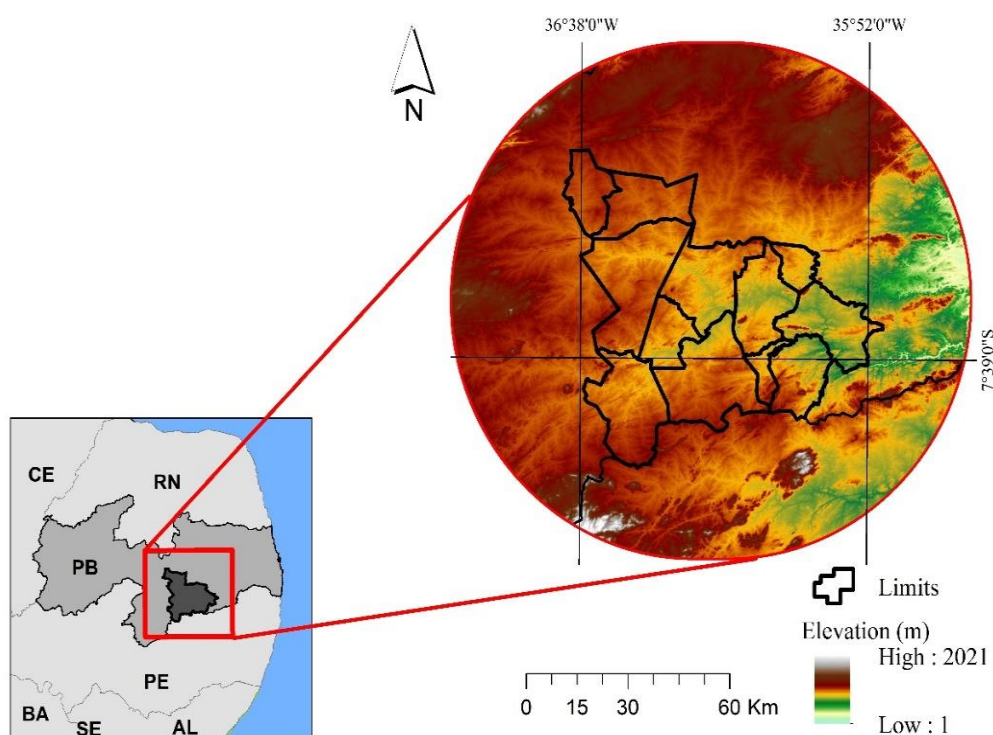


Figura 1. Localização da área de estudo. Fonte: Autor (2025)

A vegetação típica da região é a Caatinga, classificada pela SUDENE em dois tipos: hiper e hipoxerófila. A ocorrência de um ou outro tipo depende das condições climáticas e edáficas. A região possui relevo acentuado principalmente nas proximidades do Rio Paraíba e seu afluente denominado de Taperoá, onde existe um sistema de falhas e fraturas que atingem as rochas locais (Francisco, 2012).

Os solos em geral, são rasos e pedregosos, predominando os Bruno Não Cálcidos e os

Litólicos (Figura 2). Os Neossolos Litólicos são em geral rasos, com espessura inferior a 50 cm, possuindo, uma estreita camada de material terroso sobre a rocha, ocorrendo mais frequentemente, em áreas de relevo acidentado. São classificados como solos com grande potencial para aproveitamento hidroagrícola, embora necessite de um manejo eficiente devido sua tendência à salinização e à sodificação (Paraíba, 2010).

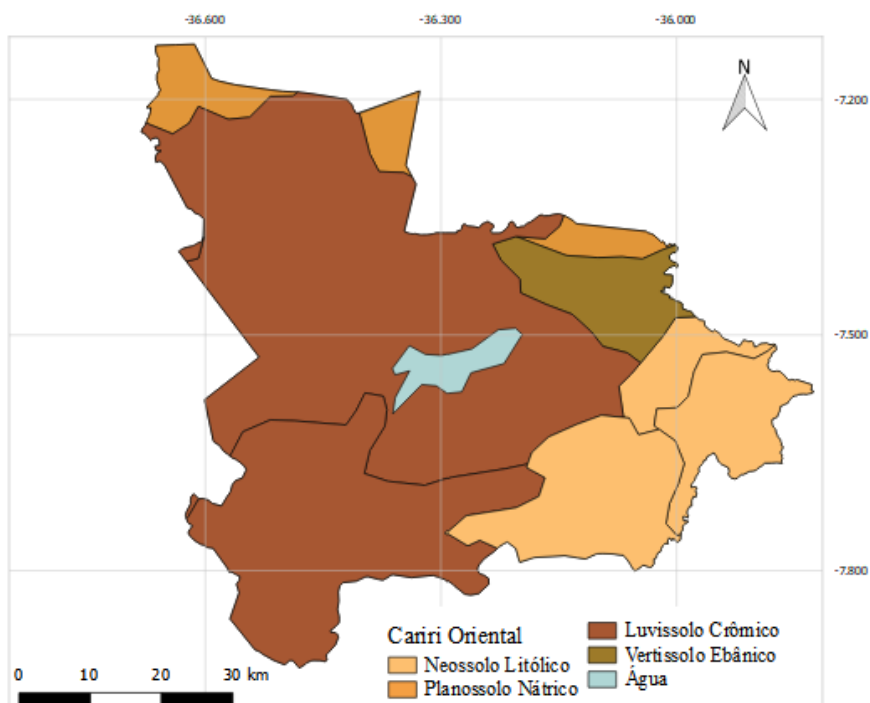


Figura 2. Mapa de solos da microrregião do Cariri Oriental.

Atributos de solos

Foram coletadas, em toda área de estudo 40 amostras de solos na profundidade de 0 a 20 cm, para quais foram realizadas as análises físicas e químicas no Laboratório de Irrigação e Salinidade, LIS da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os atributos avaliados são apresentados na Tabela 1. Foi realizada a análise exploratória dos dados obtidos, a fim de verificar a existência de dados discrepantes (outliers), pois a existência desse tipo de dados pode interferir significativamente nos resultados das análises estatísticas.

As análises foram realizadas usando o programa R versão 3.2.1 (R Development Core Team, 2015), utilizando o pacote de dados geoR (Ribeiro Júnior; Diggle, 2001).

A granulometria foi analisada a partir da metodologia descrita pela EMBRAPA, (1997). As frações granulométricas foram determinadas a partir de proporções de areia, silte e argila pelo método da pipeta e expressas em %. A densidade de partículas do solo (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico e a densidade do solo (D_s) determinada pelo método da proveta para amostra deformada, ambas expressas em $g\ cm^{-3}$. A porosidade total (P_t) foi determinada a partir da relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas expressa em (%).

Os atributos químicos avaliados foram os teores de fósforo (P) e potássio (K) a partir da extração dos elementos com Mehlich-1, sendo o P determinado por colorimetria em presença do ácido ascórbico como catalisador e expresso em ($mg\ dm^{-3}$), enquanto que K determinado por fotometria de emissão de chama, expressos em ($cmolc\ dm^{-3}$). Todos os métodos utilizados nas análises podem ser encontrados em EMBRAPA, 1997. A matéria orgânica do solo (MO) foi determinada através da oxidação da matéria orgânica pelo dicromato de potássio, segundo o método Walkley-Black descrito por Mendonça e Matos (2005) e expressa em (%). O pH em água foi determinado potenciométricamente na suspensão cuja proporção de solo-líquido foi de 1:2,5 com tempo de reação de 30 minutos e agitação da suspensão antes da leitura (EMBRAPA, 1997).

A Condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) foi medida no extrato da pasta de saturação preparada segundo método descrito por Richards (1954) e expressa em ($\mu S\ cm^{-1}$). O carbono orgânico total do solo (COT), determinado a partir da análise de concentração da matéria orgânica no solo em função do teor do carbono orgânico, utilizando-se do método titulação após oxirredução por via úmida – conhecido como método Walkley-Black (EMBRAPA, 1997).

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos dos solos da microrregião do Cariri Oriental.

Atributos	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Desvio-padrão	Variância
Potássio (meq/100g de solo)	0,42	0,44	0,64	0,11	0,16	0,03
Carbono Orgânico (%)	0,92	0,84	1,85	0,40	0,37	0,14
Matéria Orgânica (%)	1,58	1,44	3,19	0,69	0,64	0,41
Nitrogênio (%)	0,09	0,08	0,18	0,02	0,04	0,00
Fósforo Assimilável (mg/100g)	1,44	1,55	2,02	0,67	0,41	0,17
pH H ₂ O (1:2.5)	6,84	6,83	8,00	5,50	0,65	0,43
Cond. Elétrica (mmhos/cm)	0,26	0,13	1,50	0,08	0,31	0,09
Areia (%)	62,49	63,65	88,50	45,20	9,61	92,42
Silte (%)	27,84	27,35	50,30	3,80	10,43	108,82
Argila (%)	9,74	8,70	23,10	1,50	5,43	29,48
Densidade do Solo (g/cm ³)	1,37	1,37	1,65	1,17	0,12	0,01
Densidade de Partículas (g/cm ³)	2,68	2,69	2,73	2,61	0,03	0,00
Porosidade (%)	48,75	49,26	55,77	39,46	4,57	20,93

Análises estatísticas

A análise estatística foi então realizada em duas etapas: (i) estatística descritiva clássica, a qual assume que os dados observados são independentes uns dos outros não considerando sua localização no espaço e (ii) análise multivariada que consiste em empregar técnicas estatísticas para verificar semelhanças entre as variáveis na tentativa de agrupá-las usando-se os atributos físicos e químicos.

Estatística descritiva

Nesta etapa foram determinadas, as seguintes medidas de posição (média, mediana, valor máximo e mínimo), de dispersão (desvio padrão, variância e coeficiente de variação), permitindo caracterizar as posições centrais e de dispersão dos dados, além de expressar a forma de distribuição.

Análise fatorial (AF)

A análise Fatorial (AF) foi utilizada para identificar as relações existentes entre o conjunto de variáveis observáveis, definidas como dependentes, e uma variável latente ou fator (Corrar et al., 2007). Tal técnica possibilitou identificar as dimensões isoladas da estrutura dos dados para então determinar o grau em que cada variável é explicada por cada dimensão ou fator (Manly, 2008). A composição do modelo de análise fatorial foi estimada a partir da Eq.1.

$$X_i = a_i F + \varepsilon_i \quad (1)$$

Sendo: X_i : variável analisada padronizada (média zero e desvio padrão 1); a_i : é uma constante (carga fatorial); F : Fator (com média zero e desvio-padrão

1) comum a todas as variáveis; ε_i : erro (que é específico de cada variável).

O grau das correlações simples com as correlações parciais foi estimado utilizando-se a estatística proposta pelo teste Kaiser Meyer Oklin (KMO) de acordo com a Eq. 2.

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} \sum a_{ij}^2} \quad (2)$$

em que: r_{ij}^2 = para todo $i \neq j$ é o coeficiente de correlação original entre variáveis; a_{ij}^2 é o quadrado dos elementos fora da diagonal da matriz anti-imagem da correlação e este corresponde ao coeficiente de correlação parcial.

Com intuito de redistribuir a variância dos primeiros fatores para os demais e atingir um padrão fatorial mais simples e teoricamente mais significativo foi utilizado a técnica de rotação dos fatores a partir do método "Varimax" (Hair et al., 2009). Assim, foi necessário testar se a matriz de correlações é uma matriz identidade e avaliar a possível adequação da análise fatorial. Logo, utilizou-se o teste de esfericidade de Bartlett a partir da Eq.3.

$$X^2 = - \left[n - 1 - \frac{1}{6}(2p + 5) \right] \sum_{i=1}^p \ln \lambda_i \quad (3)$$

em que: λ_i representa a variância explicada por cada fator; n é o número de observações; p , o número de variáveis envolvidas no processo.

A cumunalidade foi utilizada como critério para validação das variáveis no ajuste do modelo fatorial e foi determinada pela estimativa da

variância de X_i explicada através dos fatores comuns e foi determinada seguindo a Eq.4.

$$h_i^2 = a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + \dots + a_{im}^2 \quad (4)$$

De acordo com o número de observações que fazem parte do conjunto de dados analisados torna-se necessário a delimitação ou a seleção das dimensões que possam descrever com maior grau a variabilidade presente na análise. No presente estudo foi utilizada a técnica de raiz latente como método restritivo para limitar a quantidade de fatores.

Índice de produtividade do solo (IPS)

O IPS foi definido como uma combinação linear dos escores fatoriais e a proporção da variância explicada por cada fator em relação à variância dos fatores comuns que descrevem as principais características pedológicas da área de estudo a partir da Eq. 5. Para melhor detalhamento da metodologia propõe-se consultar (Bryman; Cramer, 2001)

$$F_{ij} = b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_px_{ip} \quad (5)$$

Em que: F_{ij} é a variável dependente não observável, mas que pode ser estimada por intermédio da técnica de análise fatorial fazendo uso da matriz do vetor X de variáveis observáveis.

A matriz F_{ij} de regressão a ser estimada a partir dos n escores fatoriais pode ser prejudicada devido à magnitude e/ou devido às unidades de medida das variáveis dependentes x. Neste caso, torna-se necessário substituir a matriz original x_{irs} pela matriz de variáveis padronizadas W_{ij} e estimados seguindo a Eq. 6:

$$W_{ij} = \frac{(x_i - \bar{x})}{s} \quad (6)$$

em que: x_i é o valor observado; $\bar{x}$ é o valor médio e s é o desvio padrão das observações.

Assim a estimativa do IPS foi obtida de acordo com a Eq. 7:

$$IPS = \sum_{j=1}^q \left(\frac{\lambda_j}{\sum_j \lambda_j} \times FP_{ij} \right), 0 \leq IPS \leq 1 \quad (7)$$

em que: λ_i representa a variância explicada por cada fator; $\sum_j \lambda_j$ é a soma total da variância explicada pelo conjunto de fatores comuns e FP_{ij} é o escore padronizado para se obter os valores positivos dos escores originais essenciais para hierarquizar as observações.

A escala hierárquica de classificação do solo corresponde aos quantis estatísticos determinados pela frequência das observações: $0 \geq IPS < 0,30$ = Produtividade inexistente, $0,30 \geq IPS < 0,33$ = Produtividade muito baixa; $0,33 \geq IPS < 0,42$ = Produtividade baixa; $0,42 \geq IPS < 0,54$ = Produtividade média; $0,54 \geq IPS < 0,67$ = Produtividade moderada; $0,67 \geq IPS < 0,85$ = Produtividade alta.

Métodos geoestatísticos

O tratamento de dados foi desenvolvido no software Qgis 3.34.15, que possui ferramentas geoestatísticas com o interpolador escolhido para este estudo, Inverse Distance Weighted (IDW).

Interpolação por Inverse Distance Weighted (IDW)

O método Inverse Distance Weighted (IDW) prediz um valor para algum local não medido utilizando-se os valores amostrados à sua volta, que terão um maior peso do que os valores mais distantes, ou seja, cada ponto possui uma influência no novo ponto, que diminui na medida em que a distância aumenta (Jakob; Young, 2006). Desta forma, a influência de cada ponto é proporcional ao inverso da distância do nó da malha.

O sistema IDW pode ser caracterizado como um interpolador tanto suaviza-te quanto exato, do tipo global, razoavelmente fiel aos dados amostrados, com rápida velocidade de processamento e que não estima valores do ponto vizinho amostrado maiores ou menores que os quantitativos máximos e mínimos dos dados informados (Landim, 2000).

Para aplicação do método IDW, alguns parâmetros de interpolação devem ser inseridos. Os números mínimos e máximos de vizinhos na interpolação determinam, respectivamente, a quantidade mínima e máxima de pontos que influenciam na estimativa dos valores. Foi definido um intervalo de no mínimo 5 vizinhos e no máximo 10 vizinhos.

O valor do expoente permite controlar o significado dos pontos conhecidos nos valores interpolados com base na distância do ponto de saída. Foi definido o valor 2, indicado por Landim (2000), como o padrão. O estimador IDW é dado pela Equação 8:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (8)$$

Sendo, Z : valor interpolado para o nó do reticulado, Z_i : valor do ponto amostrado vizinho ao nó, h_{ij} : distância entre o nó da grade e Z_i , β : expoente de ponderação, n : número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó.

Análise de agrupamento hierárquico (AA)

A técnica hierárquica de agrupamento consiste em uma série de sucessivos agrupamentos ou sucessivas divisões de elementos, em que os elementos são agregados ou desagregados. Os grupos, na técnica hierárquica, são geralmente representados por um diagrama bidimensional chamado de dendograma ou diagrama de árvore. Nesse diagrama, cada ramo representa um elemento, enquanto a raiz representa o agrupamento de todos os elementos. Para identificação das similaridades do conjunto, foi realizada esta técnica, calculando-se a distância euclidiana para o conjunto das treze variáveis, e utilizando-se o algoritmo de Ward (1963) para a obtenção dos agrupamentos similares. O resultado da análise foi apresentado em um dendograma, na identificação dos agrupamentos.

A medida de dissimilaridade mais utilizada em agrupamentos é a distância euclidiana, mesmo existindo diversas outras medidas. Uma discussão específica de várias dissimilaridades é retratada em Duran e Odell, (1974). Segundo Wilks (2006) esta função é empregada como critério para medir a distância entre dois pontos ou para designar o quanto eles são similares, de acordo com a equação abaixo:

$$d_{ij} = [x_i - x_j] = \left[\sum_{k=1}^n (x_{i,k} - x_{j,k})^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

em que: $i \neq k = 1, \dots, n$ (total de elementos amostrais); X_{ij} é o elemento observado da j -ésima variável do elemento amostral i ; X_{kj} é o elemento observado da j -ésima variável do elemento amostral k .

O método de classificação hierárquico foi utilizado nesse trabalho, cujo critério de agrupamento foi o de Ward. Tal método dispõe-se de uma análise de variância para mensurar a distância entre os grupos (Schunk Silva; Nery, 2000). O método hierárquico de Ward procura por partições que minimizem a perda associada a cada agrupamento (Mingoti, 2005). A perda é calculada mediante diferença entre a soma dos erros quadráticos de cada padrão e a média da partição em que está contido, conforme Equação 10:

$$SQD = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (10)$$

em que: n é o número total de elementos do agrupamento e x_i é o i -ésimo elemento do agrupamento.

Resultados e discussão

A análise descritiva dos atributos físicos e químicos do solo revelou uma ampla variabilidade entre as amostras coletadas na microrregião do Cariri Oriental da Paraíba. Os solos apresentaram predominantemente textura arenosa a franco-arenosa, com teores médios de areia acima de 60%, o que é típico dos Neossolos Litólicos e Luvisolos da região semiárida (Figura 3). Essa condição favorece a drenagem, mas pode comprometer a capacidade de retenção hídrica e o armazenamento de nutrientes, aspectos essenciais para a sustentabilidade agrícola em ambientes de baixa precipitação.

A partir da análise física do solo foi possível verificar que os solos da área de estudo possuem, em média, textura franco arenosa, com percentuais de areia variando de 45,2 a 88,5% (Figura 3), o que confere com o material de origem referente às rochas areníticas predominando os solos Bruno Não Cálcicos e os Litólicos. As partículas de menor tamanho como argila e, principalmente silte, foram encontradas em quantidades relativamente pequenas, sendo 9,7% a média de argila e 27,8% a média de silte.

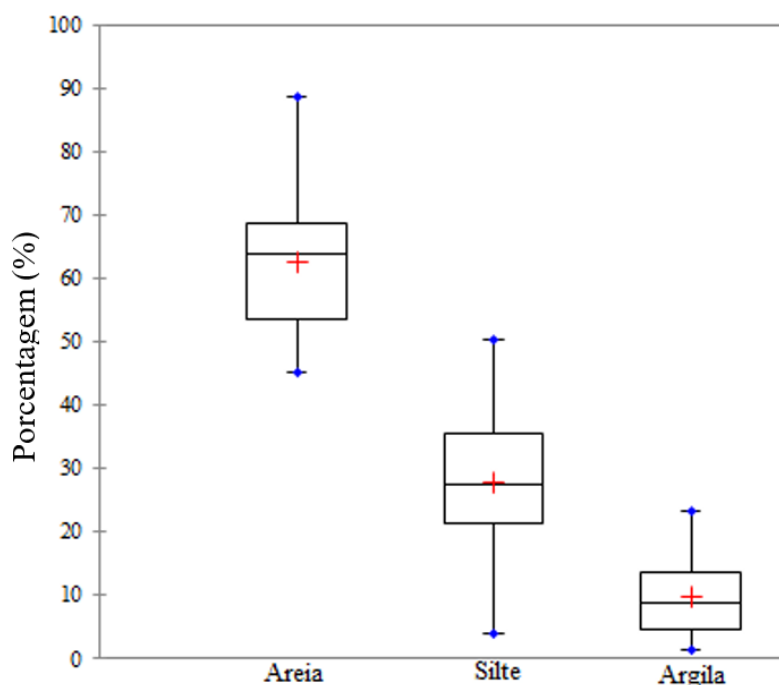


Figura 3. Variabilidade da distribuição dos componentes físicos do solo para a área de estudo.

As pequenas quantidades de argila associadas as grandes porções arenosas garantem uma boa permeabilidade aos solos estudados, uma vez que em áreas com muita argila a possibilidade de obstrução dos poros é potencializada, diminuindo significativamente a permeabilidade do solo (Santos et al., 2012a).

Na Fig.4 verifica-se que o teor de carbono orgânico total se situou no intervalo de 0,45-1,9-. Para os níveis de matéria orgânica no solo (MO), está se apresentou uma faixa média de 1,57. O acréscimo de MO, decorre pelo fato da taxa de decomposição das palhas e outros materiais mantidos na superfície do solo. Em consequência, a alteração no teor de MO, tanto em quantidade como em qualidade, tem implicações graduais nas

alterações do pH, conforme Zanão Júnior *et al.* (2007).

Entre os atributos químicos, observou-se grande variação nos teores de carbono orgânico total (COT), matéria orgânica (MO), fósforo (P) e potássio (K), o que pode refletir a influência do uso e manejo do solo, bem como da cobertura vegetal. A matéria orgânica, por exemplo, é altamente sensível ao tipo de manejo adotado e é considerada um indicador-chave da qualidade do solo (Silva, 2021). Os valores de pH variaram entre 5,2 e 7,6, indicando solos desde levemente ácidos até neutros, o que pode influenciar diretamente a disponibilidade de nutrientes essenciais e a atividade microbológica (Oliveira-Silva et al., 2020)

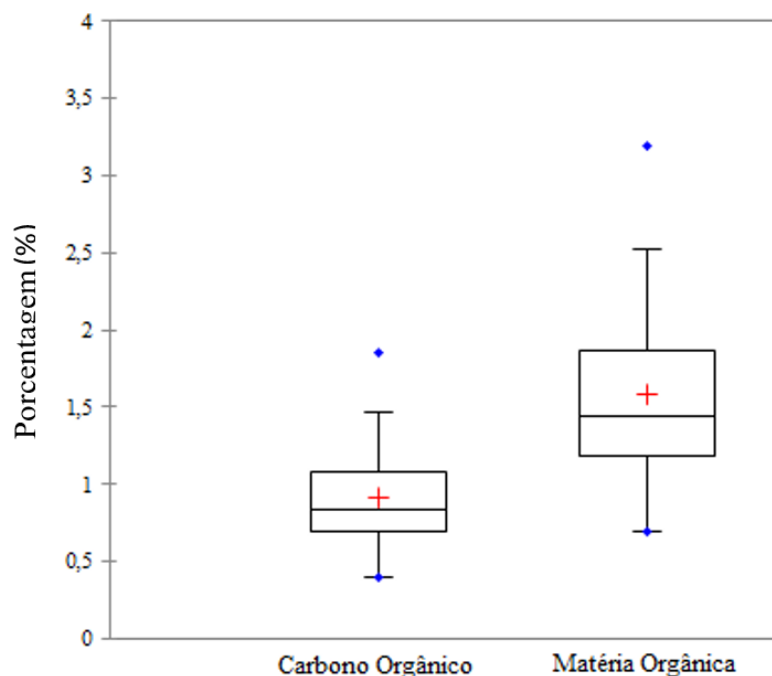


Figura 4. Variabilidade da distribuição do carbono orgânico e da matéria orgânica do solo da área de estudo.

A matéria orgânica do solo influencia direta e indiretamente todas as características do solo, de modo que a diminuição do carbono orgânico total está associada à degradação física dos solos, e seu incremento através do manejo adequado modifica a capacidade de carga dos solos, que se tornam menos vulneráveis à compactação (Blanco-Canqui et al., 2009; Viana, et al., 2011; Salomão et al., 2020).

Com os dados padronizados, estabelece-se a matriz de correlação com o intuito de verificar o percentual de correlações significativas entre as variáveis e qual a relevância dessas correlações para as análises posteriores (Neto, 2013). A princípio foi realizado a interpretação da matriz de correlação, Análise Fatorial (AF) e Análise de Agrupamento (AA), com base nos atributos do solo, bem como a interação entre as variáveis.

Com o estudo de correlação entre os atributos do solo, verificou-se que a matriz de correlação de todas as variáveis estudadas de forma isolada, apresentou elevado número de correlações fortes e significativas ($P < 0,05$). Esse fato comprova a viabilidade do uso da AF e AA no estudo dos atributos do solo.

Portanto de acordo com os resultados obtidos na (Tabela 2) foi possível avaliar a partir do Teste de Kaiser Meyer Olkin – KMO os padrões existentes entre as correlações entre os atributos do solo estudados.

Tabela 2. Estatística do teste Kaiser Meyer Olkin – KMO para adequação da amostra

Variáveis	KMO
Potássio	0,375
Carbono Orgânico	0,695
Matéria Orgânica	0,697
Nitrogênio	0,761
Fósforo Assimilável	0,405
pH	0,600
Cond. Elétrica	0,451
Areia	0,447
Silte	0,466
Argila	0,390
Densidade do Solo	0,638
Densidade de Partículas	0,444
Porosidade	0,624
KMO	0,562

A estatística do teste indicou um valor na ordem de 0,562, indicando a existência de correlações parciais entre pares de variáveis, e assim de acordo com (Hair et al., 2009) quando analisado o padrão de correlação entre as variáveis, a matriz de correlações deve exibir a maior parte dos coeficientes com valor acima de 0,50, torna-se possível à aplicação da análise fatorial (AF) ao conjunto de observações. O teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) varia entre 0 e 1. Quanto mais perto de 1 melhor. Palant (2007) sugere 0,6 como um

limite razoável. Friel (2009) sugere a seguinte escala para interpretar o valor da estatística KMO: entre 0,90 e 1 excelente; entre 0,80 e 0,89 bom; entre 0,70 e 0,79 mediano; entre 0,60 e 0,69 medíocre; entre 0,50 e 0,59 ruim e entre 0 e 0,49 inadequado. Já Hair Jr et al. (2006) sugerem 0,50 como patamar aceitável.

Após a verificação da adequação da base de dados e tomados os atributos que são passíveis da aplicação da AF foi possível extrair os fatores principais que irão compor a capacidade de explicação da variância total do conjunto de dados. Além disso, o número de fatores a ser extraído foi estabelecido de forma a explicar acima de 70% da variância total dos dados (Neto, 2013).

A partir da Figura 5 verifica-se a distribuição do Scree test que descreve a dispersão do número de fatores em função da curva da variância de cada fator buscando assim identificar o momento de linearidade da curva.

Ainda como critério de escolha do número de fatores para descrição do conjunto de observações utilizou-se a soma da variância acumulada para determinar a quantidade de fatores que devem ser extraídos. Hair Jr et al. (2006) sugerem o patamar de 60% como sendo aceitável. A partir dos resultados do teste de esfericidade identificaram-se inicialmente apenas dois fatores de influência na variável dos atributos do solo. Estes fatores definem a combinação linear entre as variáveis dos atributos do solo, as quais apresentam capacidade de explicar 79,60% da variabilidade total existente entre as variáveis dependentes (Tabela 3).

Tabela 3. Variância total explicada pelos fatores.

Fatores	Condições iniciais			Componentes rotacionados	
	Autovalor	Variabilidade (%)	% Variância acumulada	Variabilidade (%)	% Variância acumulada
F1	3,85	55,01	55,01	43,99	43,99
F2	1,72	24,58	79,60	35,61	79,60
F3	0,48	6,86	86,46	-	-

A capacidade de explicação ou de retenção dos atributos pelos fatores estão associados diretamente ao valor da comunalidade; tais valores são significativos quando ($h^2 > 0,6$) calculados após ajuste da rotação Ortogonal VARIMAX explicam a intensidade da variabilidade total de cada variável ou conjunto de fatores (Tabela 4). Da observação da comunalidade, vê-se que 99,5% da

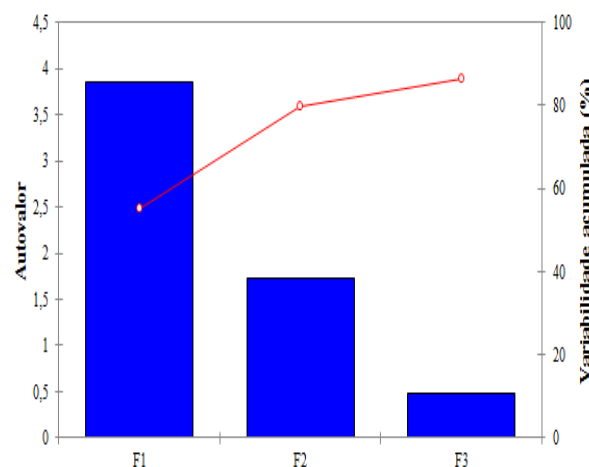


Figura 5. Scree plot - Curva da variância dos fatores.

Os autovalores obtidos na AF com o intuito também de maximizar a variância dentro de cada fator, adotou-se o método de rotação VARIMAX com o objetivo de detectar quais variáveis representam melhor os fatores e com isso facilitar a interpretação dos resultados. O primeiro fator (F1) explicou 55,01% da variância total, fator este constituído de atributos químicos. O segundo fator (F2) explicou 24,58% da variância contendo os atributos físicos. O método de rotação refere-se ao método matemático que rotacional os eixos no espaço geométrico. Isso torna mais fácil estabelecer quais variáveis são carregadas em quais componentes, ou seja, o principal objetivo da rotação dos fatores é tornar o resultado empírico encontrado mais facilmente interpretável, conservando as suas propriedades estatísticas.

variância da variável CO é explicada pelos dois fatores comuns, enquanto apenas 56,7% da variância da silte é explicada por esses mesmos fatores. O complemento desses valores, denominado unicidade, indica o quanto os fatores comuns falham em explicar a variância total unitária da variável.

Tabela 4. Fatores extraídos por componentes principais, destacando os atributos químicos e físicos do solo com cargas superiores a 0,6.

Atributos	Químico (F1)	Físico (F2)	Comunalidade
CO	0,981	0,180	0,995
MO	0,981	0,181	0,994
N	0,985	0,157	0,995
Areia	-0,176	-0,764	0,615
Silte	-0,066	0,751	0,568
Ds	-0,268	-0,850	0,794
Pt	0,279	0,730	0,611

CO.: Carbono Orgânico; MO.: Matéria Orgânica; N.: Nitrogênio; Ds.: Densidade do Solo; Pt.: Porosidade Total

Quando analisamos os atributos após a rotação varimax (Figura 6) nota-se a porosidade total (Pt) variou de 39,4 a 55,7%, com uma média de 48,7%. Determinante na formação da porosidade, a textura explica a ocorrência de poros grandes em solos arenosos, os quais também apresentam baixa porosidade total comparados a solos mais argilosos devido ao maior volume de microporos nestes últimos. De acordo com Freire (2006), uma porosidade de 50% é esperada para solos de textura franca e de 40 a 60% para solos arenosos. Assim, pode-se inferir que o Pt se apresenta abaixo do esperado em alguns pontos, mas em termos médios está de acordo com o intervalo esperado.

A densidade do solo (Ds) sofre influência da textura, estrutura e do grau de compactação,

forneendo a medida da relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros (volume total). A Ds encontrada foi de 1,1 a 1,6 g cm⁻³ e CV de 8,9%, classificada como de baixa variabilidade, concordando com os resultados de Santos et al. (2012b) e Assis et al. (2019) que encontraram CV abaixo de 10% para este atributo. Para solos arenosos a Ds varia de 1,3 a 1,8 g cm⁻³, o que correspondem às análises granulométricas apresentadas anteriormente. Por ser um atributo dependente de outros fatores que influenciam a disposição das partículas do solo, a Ds é capaz de fornecer indicações sobre a sua influência em propriedades como infiltração e retenção de água, permitindo analisar o estado de conservação do solo.

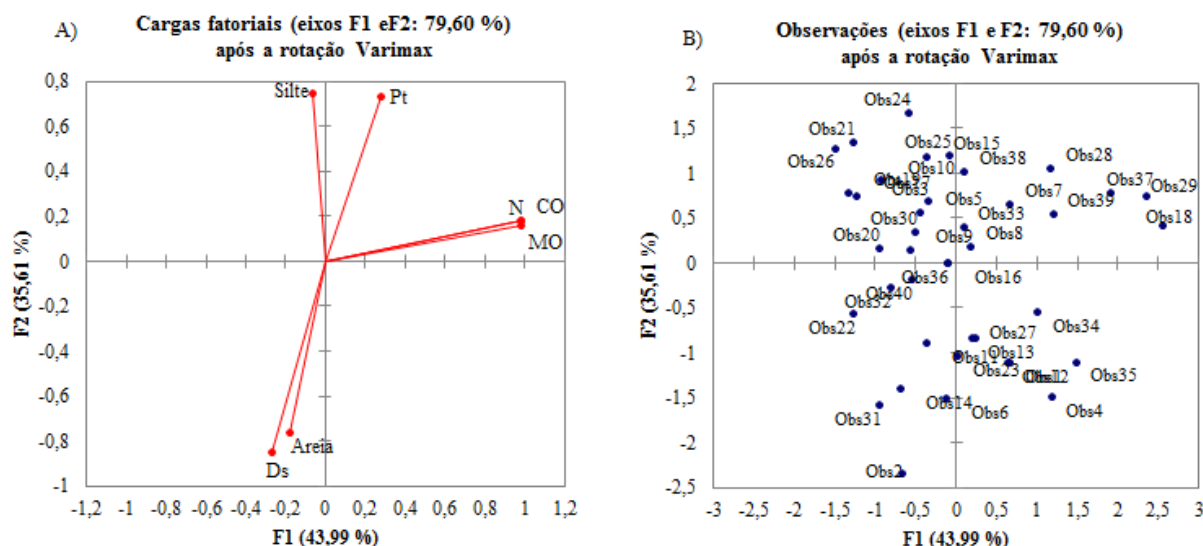


Figura 6. Distribuição dos fatores F1 (Químico) x F2 (Físico), mostrando a relação dos atributos químicos e físicos do solo na área de estudo (A) e distribuição os pontos observados de acordo com as cargas fatoriais (B).

A porosidade total (Pt) apresentou correlação positivo com o F2, enquanto que a Ds e o teor de areia se correlacionaram negativamente com esse fator. O silte apresentou correlação

negativo com o F1. As demais variáveis se comportaram de maneira positiva para ambos os fatores F1 e F2. A análise fatorial possibilitou resumir a informação contida em atributos

químicos e físicos dos solos e identificar a estrutura das relações entre essas variáveis e a distribuição nos solos, por se tratar de variáveis de grande importância para o conhecimento prévio da área de estudo.

Índice de Produtividade do Solo (IPS)

Os métodos para a construção de índices são diversos, todavia com a utilização da AF foi possível verificar que todas as variáveis são significativamente importantes para compor os fatores, e explicar as interrelações existentes e a estrutura de covariância proveniente da correlação de cada variável e seu respectivo fator.

Da observação das comunalidades (Tabela 5), vê-se que as principais variáveis com maior capacidade de explicar cada um dos quatro fatores: no fator 1 (F1) = Carbono Orgânico (99,2%); Matéria Orgânica (99%) e Nitrogênio (97,9%); Fator 2 (F2) = Silte (100%); Fator 3 (F3) = Fósforo (78%); Fator 4 (F4) = Porosidade Total (100%) mostrando que boa parte das variâncias dessas variáveis foi explicada pelos respectivos fatores de agregação, podendo, assim, caracterizar a dinâmica da produtividade da microrregião.

O fator 1 representa a parte comum mais abrangente das variáveis observadas, podendo ser associado ou nomeado como índice de produtividade do solo (IPS). Adotou-se o procedimento de rotação ortogonal produziu cargas fatoriais após a rotação da matriz de dados, que

possibilitou a associações das variáveis a um determinado fator. Após a avaliação dos resultados da análise fatorial é possível a construção de um ou mais fatores de escala a partir da constatação da existência de determinadas dimensões. O interesse é examinar os dados amostrais em termos dessas dimensões, ao invés de examinarmos cada variável separadamente identificando assim quatro principais forças concorrentes que atuam sobre o processo de produtividade do solo na microrregião do Cariri Oriental Paraibano. Duas são motivadas por variáveis que caracterizam as componentes químicas do solo, definidas pelos fatores F1 e F3, e as outros dois fatores são representados por F2 e F4, caracterizada por variáveis que refletem o comportamento físico do solo na região.

Como o IPS representa uma variável estatística, com contribuições preponderantes das variáveis MO, N, Areia, Silte, P, K e Pt, as variações do IPS mostrou-se bastante associadas às alterações da qualidade do solo. Diferentes usos de solos podem provocar alterações nas relações entre as variáveis.

As funções do IPS consistem em avaliações simultâneas após a definição do comportamento dos indicadores e distribuição de seus pesos. O IPS é a soma do desempenho individual de cada função, e cada função é individualmente o reflexo de um determinado conjunto de atributos.

Tabela 5. Matriz de componentes após cargas rotacionadas pelo método VARIMAX.

Variáveis	F1	F2	F3	F4	Comunalidade final
Potássio	0,089	-0,057	0,528	-0,047	0,292
Carbono Orgânico	0,976	-0,072	0,166	0,088	0,992
Matéria Orgânica	0,975	-0,075	0,164	0,090	0,990
Nitrogênio	0,966	-0,081	0,163	0,114	0,979
Fósforo Assimilável	-0,057	0,199	0,801	0,309	0,780
pH H ₂ O	-0,086	-0,053	0,292	0,660	0,531
Areia	-0,199	0,850	0,073	-0,152	0,791
Silte	-0,168	-0,910	0,281	0,254	1,000
Argila	0,600	0,146	-0,400	-0,218	0,588
Densidade do Solo	-0,177	0,610	0,091	-0,686	0,884
Densidade de Partículas	-0,192	0,106	-0,180	0,024	0,081
Porosidade Total	0,231	-0,466	-0,176	0,836	1,000

Verifica-se na Figura 7 que o primeiro quartil apresenta uma variação entre 0 a 0,30, sendo assim classificado pelo IPS com produtividade inexistente, o segundo e terceiro quartil a frequência acumulada varia de 0,30 a 0,33 e 0,33 a 0,42 respectivamente, que de acordo com

o IPS é classificado como produtividade muito baixa e produtividade baixa.

No quarto e quinto quartil aponta uma frequência de distribuição do IPS entre 0,42 e 0,67, sendo considerada uma produtividade de média a moderada. Por fim no sexto quartil foi possível

verificar que a distribuição do IPS relacionada com frequência acumulada, apresentou variação de 0,67

a 0,85, classificada de acordo com o IPS com produtividade alta.

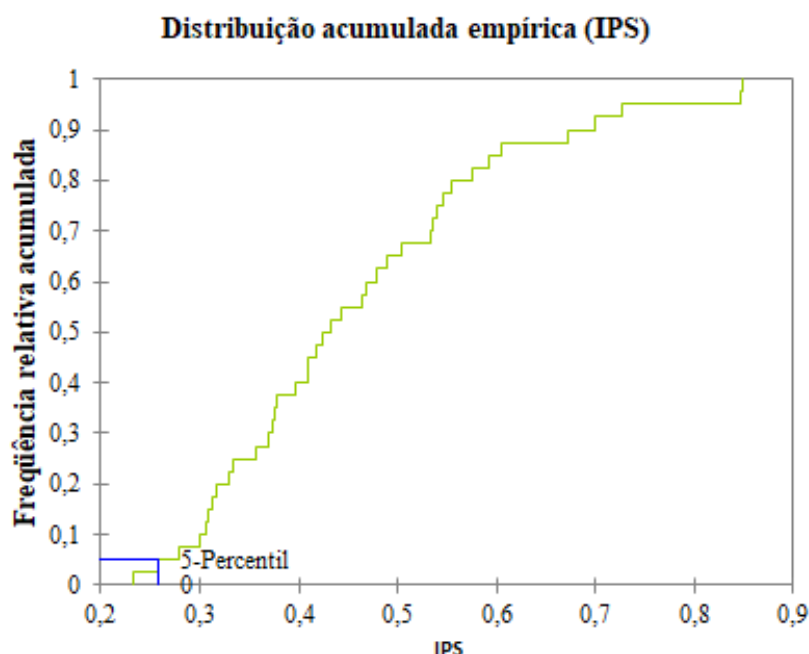


Figura 7. Distribuição da frequência acumulada dos percentis do IPS.

Portanto, embora o IPS apresente uma avaliação simultânea e integrada dos indicadores de solo, com base nos resultados deste estudo, recomenda-se que sua aplicação considere fundamentalmente a classificação pedológica, com especial atenção à textura do solo e a classificação climática, essencial para a interpretação dos valores obtidos.

Variabilidade espacial dos parâmetros pedológicos

Mapas temáticos dos atributos químicos do solo (M.O, N, P e K), dos atributos físicos do solo foram gerados a fim de representarem a distribuição espacial dos mesmos. Ressalta-se que a amplitude dos dados após a interpolação é menor que a dos dados originais, pois o interpolador suaviza a distribuição, isto é, aumenta os valores mínimos e diminui os máximos.

A manutenção e melhoria da qualidade do solo em sistemas de cultivo contínuo é fundamental para garantir a produtividade agrícola e a qualidade ambiental para as gerações futuras. Nesse sentido, a matéria orgânica (Figura 8A) desempenha um papel importante, sendo considerada a principal indicadora da qualidade do solo, servindo de base para sustentabilidade agrícola (Lal, 2004). A quantidade de MO depende da entrada de material orgânico, da sua taxa de mineralização, da textura do solo e do clima, entre outros fatores. Esses fatores interagem de modo que o teor de MO tende

em direção a um valor de equilíbrio em áreas sob vegetação nativa (Khorramdel et al., 2013).

Portando quando nos referimos à matéria orgânica do solo temos que entender que ela constitui a base fundamental para a produtividade agrícola sustentável, pois através dos seus efeitos diretos, é capaz de modular as condições químicas e físicas do solo, e consequentemente, a eficiência nutricional, sendo considerada um importante indicador da qualidade do solo. As influências mais evidentes da MO em relação às condições físicas do solo são: estabilização da temperatura do solo, favorecendo as plantas; aumento da capacidade de retenção de água no solo, favorecendo o desenvolvimento das raízes, principalmente em regiões com riscos de veranicos; melhor estabilidade dos agregados e redução do escoamento de água superficial, diminuindo os riscos de erosão (Conceição et al., 2005). Quanto maior a quantidade de resíduos orgânicos retornados para o solo, maior a cobertura da superfície do solo e maior a proteção da estrutura do solo contra perturbações naturais e antropogênicas (Blanco-Canqui & Lal, 2009).

Na Figura 8B, é apresentada a variável nitrogênio (N), um nutriente altamente dinâmico no solo, cujos compostos reagem rapidamente com o ambiente. A maior parte do nitrogênio, mais de 90% encontra-se na fração orgânica do solo, que atua como um importante reservatório, liberando formas mais disponíveis para as plantas, como o

nitrito (NO_2^-) e o amônio (NH_4^+) (D'Andrea et al., 2004; Debiassi et al., 2019).

Estas formas minerais, apesar de representarem pequena parcela do N total, são de extrema importância, do ponto de vista nutricional, já que são elas as absorvidas pelos vegetais e

microorganismos (Fageria et al., 2011). Sendo assim o conhecimento das quantidades de nitrogênio é fundamental para que possam ser efetivamente incorporadas ao sistema de produção agrícola.

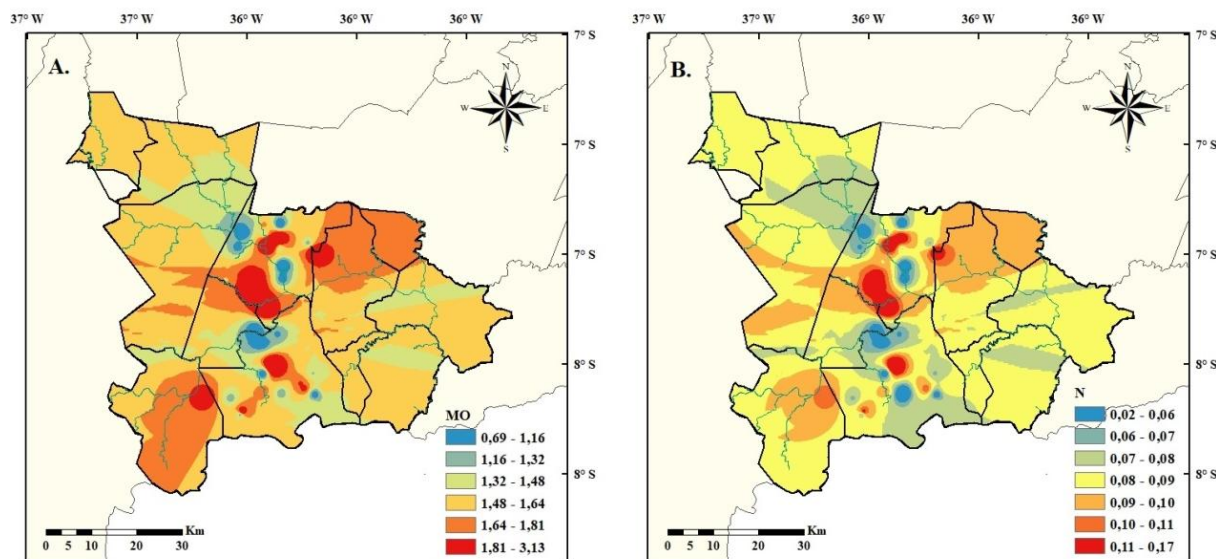


Figura 8. Distribuição espacial das variáveis (A) Matéria Orgânica (%) – MO; e (B) Nitrogênio (%) – N, na Microrregião do Cariri Oriental da Paraíba.

A análise dos mapas de distribuição espacial dos atributos granulométricos do solo (Figura 9) revela que os maiores teores de areia estão concentrados na porção superior esquerda da área de estudo, correspondente à região leste, enquanto os teores mais elevados de silte ocorrem nas porções noroeste, nordeste e sudoeste da área. De modo geral, os solos da região apresentam predominantemente textura arenosa (Figura 9A).

A textura do solo é considerada um dos principais indicadores da qualidade e produtividade do solo, influenciando diretamente processos como adesão e coesão entre partículas, dinâmica da água e do ar, capacidade de retenção de nutrientes, e resistência à compactação e erosão (Cherubin et al., 2020; Corrêa et al., 2023). Tradicionalmente, acredita-se que solos com maior teor de argila oferecem melhores condições para a produção agrícola devido à sua maior capacidade de retenção de água e nutrientes. Essa concepção se consolidou devido às limitações associadas aos solos arenosos, como baixa fertilidade natural, alta suscetibilidade à erosão, perda de nutrientes por lixiviação e déficit hídrico em regime de sequeiro (Donagemma et al., 2016).

Entretanto, esse paradigma tem sido progressivamente revisado nos últimos anos. Avanços em sistemas conservacionistas de manejo, como a semeadura direta, o uso de coberturas vegetais, a aplicação localizada de fertilizantes e o uso de condicionadores de solo, têm permitido o aproveitamento agrícola sustentável de solos com textura arenosa (Silva et al., 2022). Dessa forma, a produtividade agrícola deixou de estar diretamente associada à classe textural, passando a depender mais do conjunto de práticas de manejo adotadas.

Por exemplo, Santos et al. (2018) observaram que a produtividade da soja foi superior em solos de textura média e arenosa quando comparada àqueles com textura argilosa, ressaltando que os efeitos da textura sobre a produtividade também variam conforme as exigências específicas de cada cultura.

Portanto, embora a textura continue sendo um parâmetro físico essencial para o entendimento do comportamento do solo, sua influência deve ser analisada de forma integrada com fatores como clima, cultura implantada e manejo adotado, especialmente em regiões onde predominam solos arenosos.

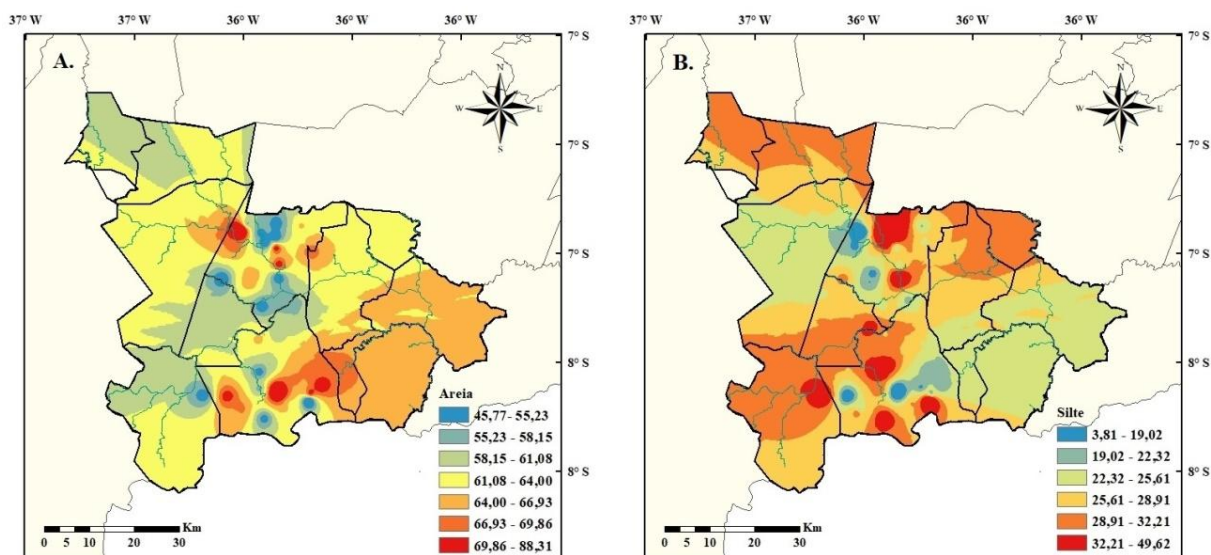


Figura 9. Distribuição espacial das variáveis granulométricas (A) Areia; e (B) Silte, na Microrregião do Cariri Oriental da Paraíba.

A análise do mapa de variabilidade espacial do teor de fósforo disponível (P) (Figura 10A) revela que sua dinâmica no solo está intimamente relacionada a fatores ambientais que afetam a atividade microbiana — organismos que podem tanto imobilizar quanto mineralizar íons ortofosfato —, além das propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo (Gonçalves et al., 2022). Em solos jovens ou moderadamente intemperizados, como os Vertissolos e Neossolos presentes na área de estudo, parte do fósforo ainda se encontra associado a minerais primários, embora sua maior fração esteja presente em formas orgânicas ou adsorvida em frações minerais secundárias (Santos et al., 2018).

A dinâmica do fósforo também depende da interação com a solução do solo, podendo funcionar tanto como fonte quanto como dreno, dependendo das características mineralógicas, das condições ambientais (pH, umidade), do manejo adotado e da adubação fosfatada. No caso da área em estudo, a análise visual do mapa indica que os maiores teores de P disponível concentram-se na porção inferior da área, sugerindo influência de práticas agrícolas específicas, como o sistema de semeadura direta e a aplicação localizada de fertilizantes em linha. Devido à baixa mobilidade do fósforo no solo, é comum observar uma alta variabilidade espacial do nutriente, com pouca

difusão além da zona de aplicação (Moreira et al., 2021).

Quanto ao potássio (K) (Figura 10B), este elemento exerce múltiplas funções fisiológicas nas plantas. Atua na ativação enzimática, no metabolismo do nitrogênio e na síntese de proteínas, além de regular a osmose celular, influenciando diretamente os processos de absorção e perda de água. Também participa da síntese e translocação de açúcares para órgãos de reserva (Souza et al., 2020). Dada sua elevada solubilidade e maior mobilidade em comparação ao fósforo, o potássio tende a apresentar uma distribuição mais homogênea no solo, embora ainda sujeito à lixiviação em solos arenosos ou mal manejados.

Tanto o fósforo quanto o potássio são nutrientes essenciais para o crescimento vegetal e, devido à baixa fertilidade natural dos solos tropicais brasileiros, seu manejo eficiente é fundamental para garantir a produtividade agrícola sustentável (Silva et al., 2023). A identificação de padrões espaciais de variabilidade desses nutrientes permite o uso racional de insumos e o desenvolvimento de estratégias de adubação localizada ou taxa variável, com base em princípios da agricultura de precisão.

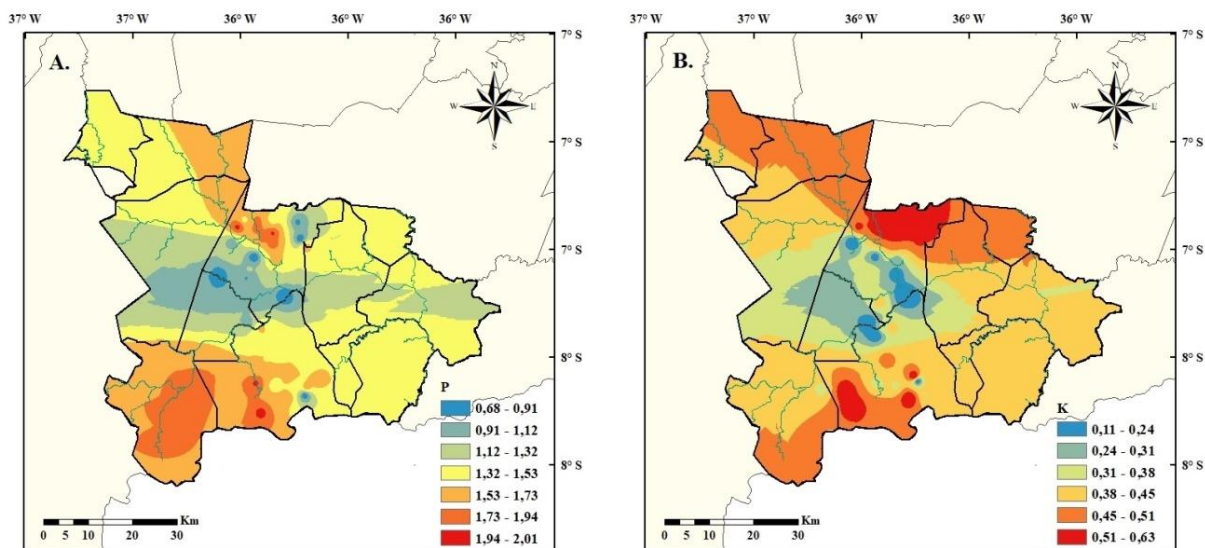


Figura 10. Distribuição espacial das variáveis (A.) Fósforo - P; e (B.) Potássio - k, na Microrregião do Cariri Oriental da Paraíba.

Na Figura 11, o Fator 4 (F4) explica 14,36% da variabilidade total e apresenta forte correlação positiva com a porosidade total (0,87) e negativa com a densidade do solo (-0,68). Tal relação evidencia que, à medida que a porosidade total aumenta, a densidade do solo tende a diminuir, refletindo alterações estruturais, especialmente na macroporosidade, a qual é prontamente impactada por práticas inadequadas de manejo. Assim, o F4 representa um fator que sintetiza atributos físicos do solo relacionados à sua porosidade e densidade.

A densidade do solo (Figura 11A), definida como a razão entre a massa de solo seco e o seu volume total (considerando os poros), está intrinsecamente ligada ao grau de estruturação do solo. Práticas inadequadas de manejo, como o tráfego intenso de máquinas agrícolas, promovem a compactação do solo, reduzindo os espaços porosos e aumentando os valores de densidade (Stefanoski et al., 2013). Este processo afeta diretamente a dinâmica da água e de nutrientes,

além de limitar a penetração e o crescimento das raízes, comprometendo o desenvolvimento das plantas e servindo como indicador do grau de degradação do solo.

Por sua vez, a porosidade total (Pt) (Figura 11B), que corresponde ao volume de espaço não ocupado por sólidos — sendo ocupado por ar e água — exerce papel fundamental no comportamento físico-hídrico do solo, como a aeração, a retenção e a condução de água. Solos com adequada porosidade proporcionam melhores condições para o crescimento radicular, facilitam o uso eficiente dos nutrientes disponíveis e podem ser utilizados como indicadores sensíveis da qualidade física do solo. Estudos recentes confirmam que tanto a densidade quanto a porosidade estão entre os atributos mais utilizados para avaliar a degradação estrutural dos solos sob diferentes usos e manejos (Cherubin et al., 2021; Moreira et al., 2023).

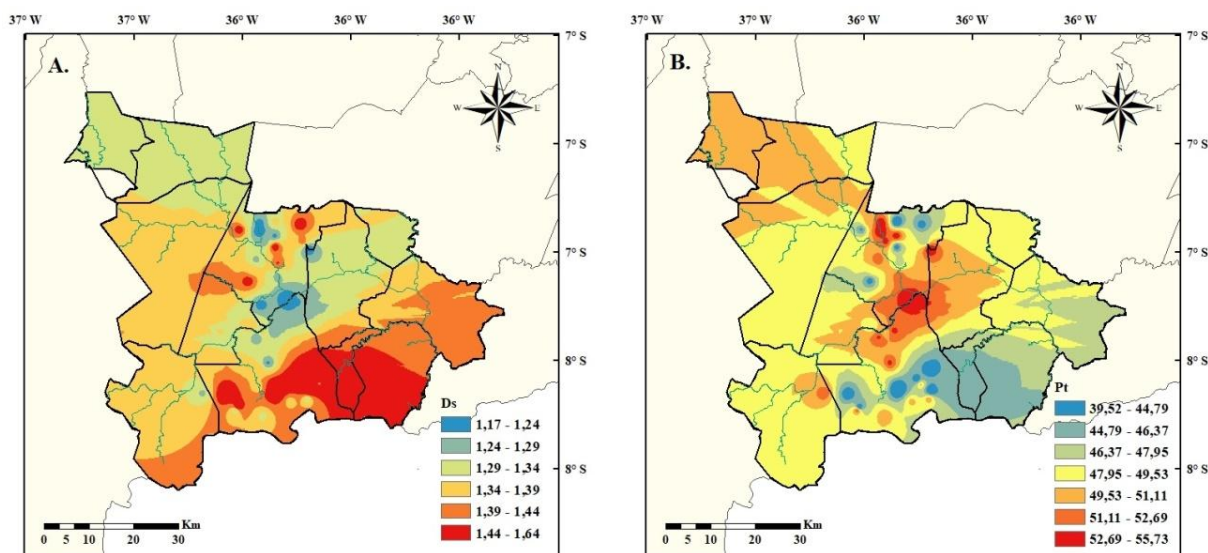


Figura 11. Distribuição espacial das variáveis (A.) Densidade do Solo – Ds; e (B.) Porosidade total – Pt, na Microrregião do Cariri Oriental da Paraíba.

Após a análise espacial das variáveis do solo na área de estudo, foi realizada uma análise de agrupamento hierárquico com o objetivo de identificar padrões de similaridade entre diferentes áreas e/ou camadas do solo, considerando os atributos físicos e químicos mais discriminantes. Utilizou-se a distância euclidiana como medida de dissimilaridade e o método de Ward como critério de agrupamento, conforme recomendado por Crispim et al. (2015). Para determinar o número ideal de grupos, adotou-se um ponto de corte no dendrograma correspondente a 10% do valor máximo da distância de formação dos grupos, resultando em sete agrupamentos distintos. Cada grupo apresenta características internas homogêneas e diferenças significativas em relação aos demais, evidenciando padrões distintos de comportamento dos atributos analisados. A aplicação de técnicas multivariadas, como a análise de agrupamento, tem se mostrado eficaz na identificação de zonas de manejo específicas em sistemas agrícolas. Por exemplo, Shukla e Sharma (2023) utilizaram a combinação de análise de componentes principais (PCA) e o método fuzzy k-means para classificar propriedades do solo, visando uma gestão agrícola mais eficiente e sustentável. Além disso, Seaton et al. (2021) demonstraram a utilidade da análise de agrupamento hierárquico com o critério de Ward na classificação de solos com base em propriedades físico-químicas, contribuindo para a compreensão da variabilidade espacial do solo em diferentes habitats.

Considerando somente os atributos relevantes (carga > 0,6) nos dois fatores, sendo que o 1º fator apresenta características predominantes

de caráter químico, ou seja, e constituído por atributos químicos e o 2º fator por características físicas, realizou-se a AA, levando-se em conta as diferentes variáveis. Utilizando-se a distância euclidiana como medida de dissimilaridade, sendo está fixada a 10%, verificou-se a formação de 7 grupos estatisticamente distintos entre si (Figura 12) favorecendo uma divisão de grupos, indicando que, com o uso conjunto dos atributos químicos e físicos, é possível ordenar os dados em sete grupos: o G1, G3, G4 e G7 englobando as variáveis N, MO, CO e Pt, sendo assim estes grupos apresentam características semelhantes em si com predominância de atributos químicos, apresentando maior representatividade da área pois, estar presente em 67,5% dos pontos analisados; isto se torna mais claro quando verificasse os valores médios de N, MO e CO sendo, 0,96, 0,92 e 0,92 respectivamente.

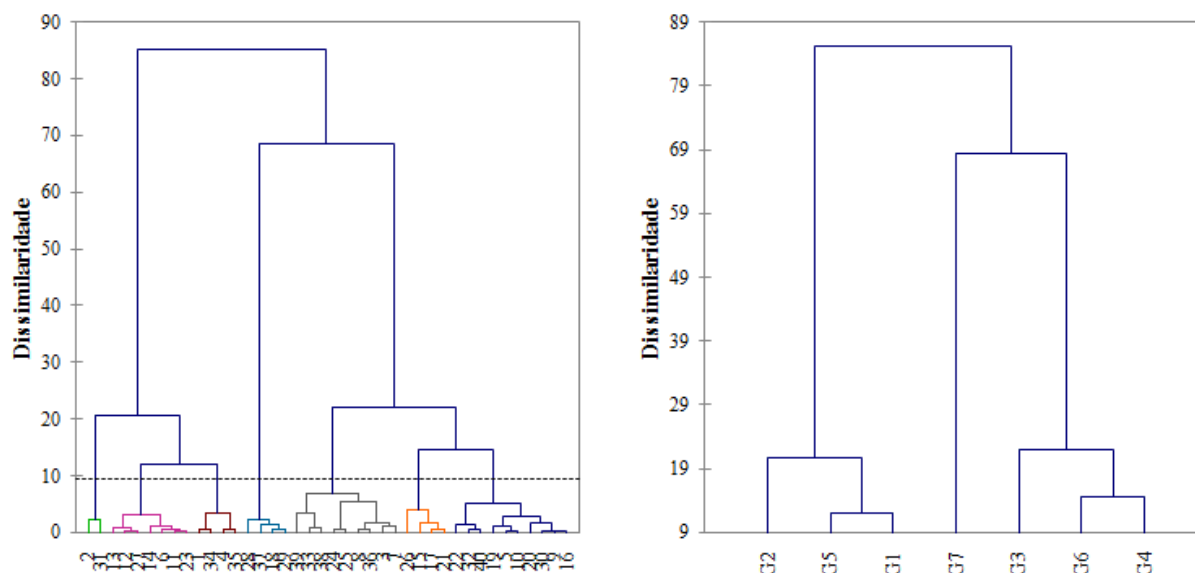


Figura 12. Dendrograma de agrupamento das interações entre as áreas analisadas.

Os G2 e G6 formados pelas variáveis Ds e areia, atributos físicos, os grupos em questão exibem maior relação com a densidade do solo por apresentarem solos com características mais arenosas, como ocorrido na profundidade de 0,0-0,2 m. No grupo formado por se tratar de um grupo homogêneo (G5), neste caso, provavelmente apresentou atributos químicos e físicos similares, haja vista a formação de um único agrupamento com estas características. Esta informação está de acordo com a afirmativa de Yemefack et al. (2005) de que esta técnica permite agrupar variáveis com características semelhantes entre si e com aumento de variabilidade entre os agrupamentos formados. Por fim com a formação de sete grupos distintos: G1, G2, G3, G4, G5, G6 e G7 englobando os atributos químicos e físicos do solo, nota-se que houve uma separação maior entre as variáveis, o que demonstra que à medida que diminui o nível de fusão, a similaridade das variáveis aumenta. Isso significa que a variação entre grupos diminui e a variação dentro do grupo aumenta. A diferenciação dos grupos foi marcante, mostrando as particularidades de cada variável, pois as características dos atributos de um mesmo grupo são semelhantes e diferentes do comportamento de outros agrupamentos.

Conclusões

O uso das técnicas de análises multivariadas foi eficiente para verificar as similaridades ou as diferenças, com base nos atributos químicos e físicos do solo da área estudada.

A análise fatorial possibilitou resumir a informação contida em atributos químicos e físicos dos solos e identificar a estrutura das relações entre essas variáveis.

O IPS apresenta uma avaliação simultânea e integrada dos indicadores de solo, com base nos resultados deste estudo, recomenda-se que sua aplicação considere fundamentalmente a classificação pedológica, com especial atenção à textura do solo e a classificação climática, essencial para a interpretação dos valores obtidos.

Com a análise de agrupamento foi possível identificar sete grupos de variáveis onde todos os grupos se diferenciaram entre si com base na resposta conjunta dos atributos físicos e químicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela concessão das bolsas de doutoramento do segundo, terceiro, quarto e quinto autores bem como o apoio financeiro sob termo (1177/2022). E ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da Bolsa de Produtividade em Pesquisa (307608/2022-0) ao primeiro autor. E ainda os autores agradecem pelo financiamento do Projeto de Pesquisa sob Termo de Outorga nº 3033/2021, Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ).

Referências

- Almeida, A. B. de, Freire, M. B. G. S., Nascimento, C. W. A. do, Oliveira, A. B. de, & Silva, F. B. V. da. (2016). Background and reference values of metals in soils from Paraíba State, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40, e0150122. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150122>
- Assis, P. C. R., Stone, L. F., Oliveira, J. M., Wruck, F. J., Madari, B. E., & Heinemann, A. B. (2019). Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. *Agrarian*, 12(43), 57–70. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v12i43.8520>
- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2009). Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical Reviews in Plant Science*, 28, 139–163.
- Boechat, C. L., Silva, F. S. da, Freire, M. B. G. S., Nascimento, C. W. A. do, & Araújo, P. R. M. (2020). Background concentrations and quality reference values for potentially toxic elements in soils of Piauí state, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8085-4>
- Bryman, A., & Cramer, D. (2001). *Quantitative data analysis with SPSS release 10 for Windows: A guide for social scientists*. New York: Routledge.
- Castilho, K. B., Cortez, J. W., Olszewski, N., Salviano, A. M., & Trindade, M. H. (2017). Análise multivariada da qualidade química de um Latossolo sob sistemas de manejo do solo. *Agrarian*, 10(36), 162–169. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v10i36.4179>
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Cerri, C. E. P., & Franco, A. L. C. (2020). Soil physical quality response to land use and management systems in the Brazilian Cerrado. *Geoderma*, 366, 114231. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114231>
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Franzluebbbers, A. J., Cerri, C. E. P., & Cerri, C. C. (2021). Soil structural quality as influenced by management practices in tropical and subtropical regions: A review. *Soil and Tillage Research*, 212, 105048. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105048>
- Clementino, J. E. de F., Farias, M. F. de, Braga, M. L., Meneses, K. C. de, Neto, G. F. V., Siva-Matos, R. R. S. da, Oliveira, I. R. de, & Souza, L. C. de. (2024). Análise multivariada de atributos físico-hídricos do solo em sistemas intercalares no Cerrado maranhense. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, 22(12), e8278. <https://doi.org/10.55905/oelv22n12-164>
- Conceição, P. C., Amado, T. J. C., Mielniczuk, J., & Spagnollo, E. (2005). Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29, 777–788.
- Corrar, L. J., Paulo, E., & Dias Filho, J. M. (2007). *Análise multivariada para cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia*. São Paulo: Atlas.
- Corrêa, M. M., Silva, B. M., Moraes, M. T., & Reichert, J. M. (2023). Textural effects on physical quality and resilience of tropical soils under long-term no-till. *Soil & Tillage Research*, 229, 105758. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105758>
- Costa, C. T. F. da, Bezerra, J. E. C. D., Paula Filho, F. J. de, Firmino, P. R. A., & Souza, R. B. de. (2020). Análise multivariada aplicada ao estudo hidroquímico das águas subterrânea na bacia sedimentar do Araripe – CE. *Águas Subterrâneas*, 34(2). <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29874>
- Crispim, D. L., Fernandes, L. L., & Albuquerque, R. L. O. (2015). Aplicação de técnica estatística multivariada em indicadores de sustentabilidade nos municípios do Marajó-PA. *Revista Principia*, 1(46), 145-154.
- D'Andréa, A. F., et al. (2004). Carbon and nitrogen storage, and inorganic nitrogen forms in a soil under different management systems. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39(2), 179–186.
- Debiasi, T. V., Calzavara, A. K., Silva, L. M. I., Bianchini, E., Pimenta, J. A., Stolf, M. R., Aidar, M. P. M., Sodek, L., & Oliveira, H. C. (2019). Metabolismo do nitrogênio de mudas de árvores neotropicais com características ecológicas contrastantes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(131). <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2923-9>
- Donagemma, G. K., et al. (2016). Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), 1003–1020.

- Duran, B. S.; Odell, P. L. Cluster Analysis. Asurvey Springer.1974.
- Embrapa Solos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa Solos, 2018.
- Embrapa. (1997). Manual de métodos de análise de solos (2ª ed., 212 p.). Rio de Janeiro: Embrapa CNPS.
- Fageria, N. K., et al. (2011). *Growth and mineral nutrition of field crops*. Boca Raton: CRC Press.
- Feitosa, I. de L., Passos, A. M. A. dos, Cipriani, H. N., Oliveira, M. S. de, Marcolan, A. L., & Vasques, G. M. (2019). Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em sistemas integrados de produção na região amazônica. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 54, e00324. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00324>
- Fiorin, T. T. (2008). Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Francisco, P. R. M., Chaves, I. de B., & Lima, E. R. V. de. (2012). Mapeamento das terras para mecanização agrícola – Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Geografia Física, 5(2), 233–249. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i2.232784>
- Freire, O. (2006). *Solos das regiões tropicais* (271 p.). Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais.
- Friel, C. M. Notes on factor analysis. Sam Houston State University. Criminal justice Center, 2009.
- Gonçalves, A. O., Silva, F. S., Lima, A. M. N., & Souza, E. D. (2022). Spatial variability of phosphorus and potassium in no-till areas under different fertilization strategies. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46, e0210203. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210203>
- Guimarães, R. M. L., Ball, B. C., Tormena, C. A., Giarola, N. E. F. B., & Silva, A. P. (2013). Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. *Soil & Tillage Research*, 127, 92–99.
- Hair Jr., J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2006). *Multivariate data analysis* (6ª ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Hair, J.F.; Black, W.C.; Babin, B.J.; Anderson, R.E.; Tatham, R.L. Análise Multivariada de Dados. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- IBGE. (2010). Contagem da população 2010. Recuperado de <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=250053>
- IBGE. (2015). Perfil dos municípios brasileiros. Recuperado de <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=250053>
- Jakob, A. A. E., & Young, A. F. (2006). O uso do método de interpolação espacial das análises sociodemográficas. In *Anais do XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais* (pp. 1–22). Caxambu: ABEP.
- Khorramdel, S., et al. (2013). Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems. *Soil & Tillage Research*, 133, 25–31.
- Klinke Neto, G., Oliveira, A. H., & Pereira, S. Y. (2023). Assessment of physics soil properties, landform and land use for mapping potential areas for groundwater recharge on the Mogi Guaçu river banks. *Revista Geoaraguaia*, 13(2), 1–24. <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/16527>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304, 1623.
- Landim, P. M. B. (2000). *Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas*. UNESP/Rio Claro: Lab. Geomatemática. Recuperado de <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>
- Manly, B. J. F. (2008). Métodos estatísticos multivariados: Uma introdução (3ª ed.). Bookman.
- Mendonça, E. S., & Matos, E. S. (2005). *Matéria orgânica do solo: Métodos de análises* (107 p.). Brasília: ABEAS.
- Mingoti, S. A. (2005). Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: Uma abordagem aplicada. Editora UFMG.
- Moreira, D. P., Coelho, A. M., Souza, E. D., & Guimarães, C. M. (2021). Phosphorus dynamics in tropical soils under conservation agriculture systems. *Geoderma regional*, 24, e00376. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00376>
- Moreira, W. H., Tormena, C. A., Silva, Á. P., & Giarola, N. F. B. (2023). Long-term

- conservation tillage improves soil physical quality and reduces compaction. *Geoderma*, 430, 116283. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116283>
- Mota, L. H. S. O., & Valladares, G. S. (2011). Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, 42(1), 39–50.
- Neto, O. N. S. Análise Multivariada dos Atributos Físicos e Químicos de um Cambissolo Cultivado sob Práticas de Manejo Sustentável da Caatinga. Mossoró-RN: UFESA. 2013.73p. Dissertação de Mestrado.
- Oliveira, A. H., Klinke Neto, G., & Pereira, S. Y. (2022). Estimativa da erosão e deposição pela Unit Stream Power Erosion and Deposition em uma sub-bacia às margens do Rio Mogi Guaçu, município de Mogi Guaçu, São Paulo, Brasil. *Revista do Departamento de Geografia*, 22, e172761. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v22-172761>
- Oliveira, J. F. de, & Dolci, D. B. (2023). Antecedentes e consequências da governança relacional na cadeia de suprimentos do agronegócio. *Revista Eletrônica de Administração*, 29(2), e139641. <https://doi.org/10.1590/1413-2311.422.139641>
- Oliveira-Silva, M., Veloso, C. L., Nascimento, D. L., Oliveira, J., Pereira, D. F., & Costa, K. D. S. (2020). Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. *Brazilian Journal of Development*, 6(7), 47838–47855. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-431>
- Palant, J. SPSS Survival Manual. Open University Press, 2007.
- Ribeiro Jr., P. J.; Diggle, P. J. (2001). The geoR package functions for geostatistical data analysis. *R.News*, v.1, p.15-18.
- Rocha, T. A. L. C. G., Silva, S. S. da, Batista, R. O., Farias, P. K. P., Oliveira, P. V. C. de, Oliveira, F. É. R. de, & Cunha, V. T. da. (2024). Valores de referência de qualidade do solo em território brasileiro. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 17(13), e14024. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.13-445>.
- Rogers, P. (2022). Melhores práticas para sua análise fatorial exploratória: Tutorial no Factor. *Revista de Administração Contemporânea*, 26(6), e210085. <https://doi.org/10.1590/1982-7849rac202210085>
- Rozendo, E. E. Q., Souza, B. I., Pires, A. L., Pedrosa, L. P. D., & Filgueira, H. J. A. (2015). Chuvas extremas e desordenamento do território na construção do risco: Um estudo de caso no município de Cabaceiras – PB, Brasil. *Cuadernos de Geografia: Revista Colombiana de Geografia*, 24(2), 189–203. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.43924>
- Salomão, P. E. A., Kriebel, W., Santos, A. A., & Martins, A. C. E. M. (2020). A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. *Research, Society and Development*, 9(1), e154911870. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i1.1870>
- Santi, A. L., Amado, T. J. C., Cherubin, M. R., Martin, T. N., Pires, J. L. F., Flora, L. P. D., Basso, C. J. (2012). Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(9), 1346–1357. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2012000900020>
- Santos, D. dos, Souza, E. G. de, Nóbrega, L. H. P., Bazzi, C. L., & Gonçalves Júnior, A. C. (2012). Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(8), 843–848.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumbleras, J. F., Coelho, M. R., & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (5ª ed.). Embrapa.
- Savioli, M. R., Zanão Júnior, L. A., Secco, D. (In memoriam), Souza, S. N. M. de, & Bassegio, D. (2024). Impactos dos métodos de exploração nos atributos físicos e químicos de um eutossolo argiloso na região ocidental do Paraná. *Revista Observatório de la Economía Latinoamericana*, 22(12), 1–20. <https://doi.org/10.55905/oelv22n12-240>
- Schunk Silva, E., & Nery, J. T. (2000). Distribuição espacial e temporal da precipitação na região Centro-Sul do estado do Paraná. In *Anais do Congresso de Biometeorologia*, Maringá, PR.
- Seaton, F. M., et al. (2021). Soil health cluster analysis based on national monitoring of soil indicators. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 686-699.
- Shukla, M. K., & Sharma, P. (2023). Fuzzy K-Means and Principal Component Analysis for Classifying Soil Properties for Efficient Farm

- Management and Maintaining Soil Health. *Sustainability*, 15(17), 13144.
- Silva, A. F., Oliveira, M. W., Ferreira, E. V. O., & Nunes, J. A. C. (2023). Phosphorus and potassium management in tropical agriculture: Challenges and perspectives. *Soil and Tillage Research*, 230, 105742. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105742>
- Silva, E. N. S., Montanari, R., Panosso, A. R., Correa, A. R., Tomaz, P. K., & Ferraudo, A. S. (2015). Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(2), 598–607. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140429>
- Silva, R. B., Oliveira, L. F. C., Souza, Z. M., & Lima, C. L. R. (2022). Impact of soil texture and management practices on spatial variability of crop yield and soil attributes. *Agricultural Systems*, 196, 103332. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103332>
- Silva, R. L. V. da. (2021). Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. *Brazilian Journal of Development*, 7(1), 6853–6875. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-463>
- Souza, G. S., Mendes, I. C., & Carvalho, A. M. (2020). Funções fisiológicas do potássio na nutrição vegetal e sua importância para o sistema produtivo. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 50, e59813. <https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5059813>
- Stefanoski, D. C., Santos, G. G., Marchão, R. L., Petter, F. A., & Pacheco, L. P. (2013). Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(12), 1301–1309. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001200001>
- Tavares, L. de S., Weber, O. L. dos S., Valadão, F. C. de A., & Espinosa, M. M. (2019). Análise multivariada de espécies florestais nativas em relação aos atributos químicos e texturais do solo na região de Cotriguaçu – MT. *Ciência Florestal*, 29(1), 281–291. <https://doi.org/10.5902/198050983577>
- Tavares, M. A. dos R., Nunes, M. C. M., Tavares, V. E. Q., Fernandes, F. F., & Sousa, L. P. de. (2020). Capacidade de uso da terra e abatimento de erosão hídrica em propriedades agrícolas do sul do Rio Grande do Sul. *Científica*, 48(4), 374–385. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2020v48n4p374-385>
- Viana, E. T., Batista, M. A., Tormena, C. A., Costa, A. C. S., & Inoue, T. T. (2011). Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 2105–2114.
- Ward J, J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, v.58, p.236-244, 1963.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (2nd ed., p. 649). Academic Press.
- Yemefack, M.; Rossiter, D. G.; Njomgang, R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. *Geoderma*, v. 125, n. 1-2, p. 117-143, 2005.
- Yokomizo, G. K. I., Farias Neto, J. T. de, Hongyu, K., & Cruz Júnior, F. de O. (2020). Multivariate analysis in plant and reproductive characteristics in progenies of açaizeiros. *Científic@ Multidisciplinary Journal*, 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.29247/2358-260X.2020v7i1.4529>
- Zanão Júnior, L. A., et al. (2007). Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidades de amostragem num Latossolo Vermelho sob semeadura direta. *Ciência Rural*, 37, 1000–1007.
- Zimmermann, B., Zehe, E. N., Hartmann, K., & Elsenbeer, H. (2008). Analyzing spatial data: An assessment of assumptions, new methods, and uncertainty using soil hydraulic data. *Water Resources Research*, 44, 1–18. <https://doi.org/10.1029/2007WR006604>