

## Índice de fertilidade natural da camada superficial dos solos do Estado da Paraíba modelado através de geotecnologias

**Paulo Roberto Megna Francisco**  
Universidade Federal de Campina Grande

**Djail Santos**  
Universidade Federal da Paraíba

**Flávio Pereira de Oliveira**  
Universidade Federal da Paraíba

**Viviane Farias Silva**  
Universidade Federal de Campina Grande

**Raimundo Calixto Martins Rodrigues**  
Universidade Estadual do Maranhão

### RESUMO

*Este trabalho objetivou estimar e mapear a fertilidade dos solos do Estado da Paraíba através de modelo paramétrico simplificado denominado Índice de Fertilidade Natural do Solo utilizando técnicas de geoprocessamento. Utilizou-se dos dados dos atributos químicos e físicos descritos nos perfis representativos dos Boletins onde foram elaborados e classificados os respectivos mapas dos atributos, e o de fertilidade superficial foi estimado por modelagem utilizando linguagem algébrica através do software QGIS<sup>®</sup>. No tratamento estatístico foi realizada a análise descritiva dos dados e o teste de normalidade utilizando o software RStudio<sup>®</sup>. O uso da técnica de pedotransferência proporcionou resultados satisfatórios aliado ao uso das geotecnologias, a geoespacialização dos atributos dos solos foi realizada com rapidez e precisão. O modelo paramétrico simplificado do índice de fertilidade natural do solo permitiu classificar, mapear e identificar os atributos mais limitantes dos solos. Embora a metodologia utilizada neste trabalho apresente limitações, permitiu levantar informações de suma importância sobre o diagnóstico físico conservacionista da área, estimando dados quantitativos da fertilidade dos solos. Os testes de normalidade de Anderson-Darling, Lilliefors e Shapiro-Wilk apresentaram-se semelhantes entre si. Os atributos dos solos considerados limitantes, a fertilidade apresentou baixos teores de nutrientes P e K, baixos teores físicos de Ds e baixos teores orgânicos de COT e MOS.*

**Palavras-chave:** Atributos químicos; Complexo sortivo; Fertilidade aparente; Pedometria, Distribuição espacial.

### Natural fertility index of the surface layer of soils in the State of Paraíba modeled using geotechnologies

### ABSTRACT

*This work aimed to estimate and map soil fertility in the State of Paraíba through modeling using geoprocessing techniques. Data from the chemical and physical attributes described in the representative profiles were used, the respective attribute maps were prepared and classified, and the surface fertility map was estimated by modeling using algebraic language through the QGIS<sup>®</sup> software. In the statistical treatment, the descriptive analysis of the data and the normality test were performed using the RStudio<sup>®</sup> software. The use of the pedotransfer technique provided satisfactory results, combined with the use of geotechnologies, the geospatialization of soil attributes was performed quickly and accurately. The simplified parametric model of the natural soil fertility index allowed classifying, mapping and identifying*



*the most limiting soil attributes. Although the methodology used in this work has limitations, it allowed gathering extremely important information about the conservationist physical diagnosis of the area, estimating quantitative data on soil fertility. The Anderson-Darling, Lilliefors and Shapiro-Wilk normality tests were similar to each other. Soil attributes considered limiting, fertility showed low levels of P and K nutrients, low physical levels of Ds and low organic levels of TOC and SOM.*

**Keywords:** Chemical attributes; Sorting complex; Apparent fertility; Pedometry; Spatial distribution.

## Índice de fertilidad natural de la capa superficial de los suelos del Estado de Paraíba modelado con geotecnologias

### RESUMEN

*Este trabajo tuvo como objetivo estimar y mapear la fertilidad del suelo en el Estado de Paraíba a través de un modelo paramétrico simplificado llamado Índice de Fertilidad Natural del Suelo utilizando técnicas de geoprocésamiento. Se utilizaron datos de los atributos químicos y físicos descritos en los perfiles representativos de los Boletines donde se elaboraron y clasificaron los respectivos mapas de atributos, y se estimó la fertilidad superficial mediante modelación utilizando lenguaje algebraico a través del software QGIS®. En el tratamiento estadístico se realizó el análisis descriptivo de los datos y la prueba de normalidad mediante el software RStudio®. El uso de la técnica de pedotransferencia brindó resultados satisfactorios, combinado con el uso de geotecnologías, la geoespacialización de los atributos del suelo se realizó de manera rápida y precisa. El modelo paramétrico simplificado del índice de fertilidad natural del suelo permitió clasificar, mapear e identificar los atributos del suelo más limitantes. Si bien la metodología utilizada en este trabajo tiene limitaciones, permitió recopilar información sumamente importante para el diagnóstico físico conservacionista del área, estimando datos cuantitativos sobre la fertilidad del suelo. Las pruebas de normalidad de Anderson-Darling, Lilliefors y Shapiro-Wilk fueron similares entre sí. Los atributos del suelo considerados limitantes, la fertilidad mostró bajos niveles de nutrientes P y K, bajos niveles físicos de Ds y bajos niveles orgánicos de TOC y SOM.*

**Palabras clave:** Atributos químicos; Complejo sortivo; Fertilidad aparente; Podometría, Distribución espacial.

### INTRODUÇÃO

Diante da crescente demanda de produção de alimentos, da dependência econômica das nações em relação à atividade agrícola e da preocupação com a preservação dos recursos naturais, verifica-se a necessidade de se aumentar a produtividade por unidade de área, reduzir os custos de produção, minimizar os impactos ambientais e aumentar a rentabilidade do produtor rural. Desta forma, conhecer a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo é fundamental, principalmente, quando existe a possibilidade de otimização de recursos para a produção (Fregonezi et al., 2014).

A produção agropecuária é influenciada, dentre outros fatores, pelos atributos do solo, os quais podem ser férteis ou se tornarem férteis através do manejo adequado. Para tanto é necessário conhecer e quantificar a variação das propriedades químicas, uma vez que os mesmos, por serem sistemas dinâmicos e abertos, estão em constantes modificações (Dalchiavon et al., 2011; Montanari et al., 2015).



A fertilidade dos solos está relacionada com a disponibilidade de elementos químicos e com a sua capacidade de fornecer nutrientes às plantas, podendo ser natural ou associada à aplicação externa. A fertilidade combina uma série de propriedades dos solos, como as propriedades biológicas, químicas e físicas. A fertilidade do solo também é uma propriedade gerenciável do solo e seu manejo é de extrema importância para a otimização da nutrição de culturas, tanto de curto prazo quanto de longo prazo, a fim de se atingir uma produção agrícola sustentável (Bruinsma, 2003).

A ciência do solo tem gerado tecnologias que permitem o uso intensivo de solos para a agricultura, apesar de limitações de vários tipos e graus que possam apresentar (Ferreira et al., 1990). Através do levantamento da fertilidade do solo pode-se determinar as correções necessárias antes da implantação das culturas, visando a exploração racional do solo (Fernandes, 1991).

Neste sentido, os mapas são fundamentais porque representam tanto uma condição de uma área de interesse quanto a prescrição dos insumos necessários para gerenciar uma condição particular de determinada área (Pierce e Nowak, 1999). Portanto, de acordo com Turetta et al. (2013), a viabilidade do mapeamento da fertilidade dos solos por regiões em uma escala maior, pode realmente servir de subsídio às recomendações para a adubação das terras.

Na atualidade o Mapeamento Digital de Solos (MDS) está se difundindo nas ciências do solo (Hengl et al., 2006; Lagacherie, 2008; Lagacherie e Macbratney, 2007; Mcbratney et al., 2003). Recentemente o MDS tem experimentado um rápido desenvolvimento de métodos novos e econômicos, devido, principalmente à crescente disponibilidade de mapas auxiliares. A significativa redução de custos em relação ao mapeamento convencional faz com que grandes áreas possam ser mapeadas com custos semelhantes aos de áreas menores e, ainda, facilitando o monitoramento mais frequente (Dobos et al., 2000).

O MDS é baseado em métodos quantitativos e técnicas estatísticas, ao contrário das abordagens tradicionais de mapeamento, que enfatizam o uso do conhecimento empírico (Hengl, 2007). O MDS difere de metodologias convencionais de mapeamento de solos, pois é baseado em pixels, os quais podem ser visualizados em diferentes resoluções. Um modelo preditivo baseia-se na estimativa das propriedades do solo, a partir de sua probabilidade de ocorrência (Andrade e Mendonça-Santos, 2016).

Iniciativas relacionadas ao mapeamento dos atributos químicos dos solos foram conduzidas nos últimos anos por Moreira et al. (2005) na Amazônia, em Goiânia conforme demonstrado em Ferreira et al. (2009), Naumov et al. (2012), Prado et al. (2007, 2008a, 2008b) proporcionado pela maior disponibilidade de dados de fertilidade dos solos; e por Andrade (2010) e Andrade e Mendonça-Santos (2016) no Estado do Rio de Janeiro; no interior do Estado de São Paulo por Vettorato (2003).

De acordo com Lagacherie (2008), a variabilidade espacial e temporal dos nutrientes dos solos pode ser identificada e modelada por meio de métodos geoestatísticos ou de mapeamento digital de solos, e conforme Filippini Alba (2014), a modelagem via sistema de informações geográficas (SIG) possibilita a fusão dessas camadas de informações, ampliando a capacidade de interpretação dos dados e auxiliando na tomada de decisão para a gestão do sistema de produção.



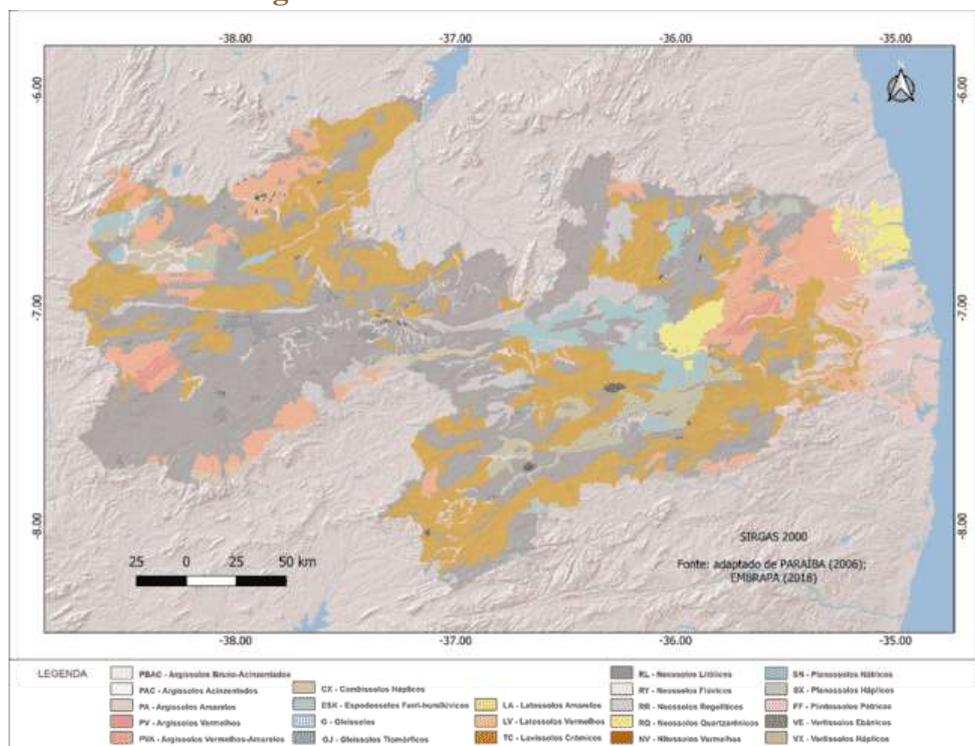
Neste sentido, propõe-se por este trabalho, estimar e mapear a fertilidade dos solos do Estado da Paraíba através de modelagem utilizando índice de fertilidade e técnicas de geoprocessamento.

## MATERIAL E MÉTODOS

O Estado da Paraíba, localizado na região Nordeste do Brasil, apresenta uma área de 56.467,24 km<sup>2</sup> (IBGE, 2021). Seu posicionamento encontra-se entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18"S, e entre os meridianos de 34°45'54" e 38°45'45"W. Ao Norte, limita-se com o Estado do Rio Grande do Norte; ao Leste, com o Oceano Atlântico; a Oeste, com o Estado do Ceará; e ao Sul, com o Estado de Pernambuco (Francisco, 2010).

As classes predominantes de solos área de estudo estão descritas no Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba (Paraíba, 1978), e estas diferem pela diversidade geológica, pedológica e geomorfológica; atendendo também a uma diversidade de características de solo, relacionadas à morfologia, cor, textura, estrutura, declividade e pedregosidade e outras características (Francisco et al., 2013). De uma forma geral os solos predominantes são os Luvisolos crômicos, Neossolos Litólicos, Planossolos Solódicos, Neossolos Regolíticos Distróficos e Eutróficos distribuídos pela região do sertão e nos cariris, os Vertissolos na região de Souza, e os Argissolos Vermelho Amarelo e os Neossolos Quartzarênicos no litoral do Estado (Francisco, 2010) (Figura 1).

**Figura 1** – Solos do Estado da Paraíba.



Fonte: adaptado de PARAÍBA (2006); IBGE (2021); EMBRAPA (2018); ESRI (2023).



Inicialmente foi criada uma planilha no Excel<sup>®</sup> onde utilizou-se dos dados dos atributos químicos e físicos de Argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ), Potencial Hidrogeniônico - pH (adimensional), Fósforo disponível - P ( $\text{g kg}^{-1}$ ), Potássio -  $\text{K}^{2+}$  ( $\text{g kg}^{-1}$ ), Cálcio -  $\text{Ca}^{2+}$  ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ), Magnésio -  $\text{Mg}^{2+}$  ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ), Sódio -  $\text{Na}^{2+}$  ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ), Alumínio  $\text{Al}^{3+}$  ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ), Hidrogênio  $\text{H}^+$  ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ), Soma de Base - SB ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ), Saturação por Alumínio - m (%), Saturação de Base - V (%), Matéria Orgânica - MO ( $\text{g kg}^{-1}$ ), Carbono Orgânico COT ( $\text{g kg}^{-1}$ ) descritos nos perfis representativos de BRASIL (1972) (Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba), PARAÍBA (1978) (Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba) e EMBRAPA (2017) (Levantamento pedológico detalhado e estoque de carbono orgânico do solo da Floresta Nacional Restinga de Cabedelo).

Para os dados de MOS foi utilizado os dados dos perfis representativos de PARAÍBA (1978) e a técnica da pedometria, denominada pedotransferência, que consiste em transferência de valores para solos com descrição similar e localizados na mesma região. De acordo com Coelho et al. (1998), essa ferramenta é recomendada para uso em grandes áreas, onde as propriedades físicas dos solos sejam semelhantes às dos conjuntos de dados empregados para seu desenvolvimento.

A partir dos dados obtidos, foram estimados a Capacidade de Troca de Cátions efetiva - CTC efetiva ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ), CTC Total ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ), Porcentagem de sódio trocável - PST (%) (Equações 1, 2 e 3), e a Densidade do solo -  $D_s$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ) foi estimada pelo método de modelagem por pedotransferência desenvolvido por Benites et al. (2007), que apresenta  $R^2$  de 0,66 para os solos brasileiros ( $1,36 \text{ g cm}^{-3}$ ) (Equação 4).

$$\text{CTC efetiva} = \text{SB} + \text{Al}^{3+} \text{ (Eq.1)}$$

$$\text{CTC Total} = \text{SB} + (\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}) \text{ (Eq.2)}$$

$$\text{PST} = \text{Na}^{2+} / (\text{CTC Total}) * 100 \text{ (Eq.3)}$$

$$D_s = 1,560 - 0,0005(\text{Argila}) - 0,010(\text{COT}) + 0,0075(\text{SB}) \text{ (Eq.4)}$$

Em que: CTC efetiva – capacidade de troca de cátions efetiva ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ); CTC Total – capacidade de troca de cátions total ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ); SB ( $\text{Na}^{2+}$ ,  $\text{K}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) – soma de bases trocáveis ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ );  $\text{Al}^{3+}$  – concentração de alumínio trocável no solo ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ );  $\text{H}^+$  - hidrogênio ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ );  $D_s$  - Densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ); argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ); COT - carbono orgânico ( $\text{g kg}^{-1}$ ); SB – Saturação por Bases (%).

Utilizando-se o software QGIS<sup>®</sup> 3.3 foi importado arquivo digital em formato shape dos solos da área de estudo na escala de 1:200.000 fornecido pela AESA (PARAÍBA, 2006), representando a área de estudo e a ocorrência e distribuição das classes de solos predominantes no Estado e seus limites atualizados (IBGE, 2021). Em seguida, utilizando a tabela de atributos os polígonos dos solos foram classificados com os valores obtidos e transformados no formato *raster* e após classificados conforme a Tabela 1. Para os cálculos de áreas foi utilizada a calculadora *raster* e o *plugin GRASS<sup>®</sup> r.report*.



**Tabela 1** – Parâmetros de classificação das variáveis da fertilidade dos solos

Variável/Atributo	Qualidade (Peso)				
	Muito Baixo (5)	Baixo (4)	Médio (3)	Alto (2)	Muito Alto (1)
pH em Água	< 4,5 e > 7	4,5 - 4,8 e 6,7 - 7	4,8 - 5,1 e 6,4 - 6,7	5,1 - 5,4 e 6,1 - 6,4	5,4 - 6,1
P (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 45	> 45
Ca <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 0,4	0,4 - 1,2	1,2 - 2,4	2,4 - 4	> 4
Mg <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 0,15	0,15 - 0,45	0,45 - 0,9	0,9 - 1,5	> 1,5
Al <sup>3+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	> 2	1 - 2	0,5 - 1	0,2 - 0,5	< 0,2
K <sup>+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 0,15	0,15 - 0,4	0,4 - 0,7	0,7 - 0,12	> 0,12
SB (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 0,6	0,6 - 1,8	1,8 - 3,6	3,6 - 6	> 6
Ac. Pot. (H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup> ) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	> 9	5 - 9	2,5 - 5	1 - 2,5	< 1
CTC (pH 7,0) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 1,6	1,6 - 4,3	4,3 - 8,6	8,6 - 15	> 15
CTC (efetiva) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 0,8	0,8 - 2,3	2,3 - 4,6	4,6 - 8	> 8
V - Sat. Base (%)	< 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	> 80
m - Saturação por Al (%)	> 75	50 - 75	30 - 50	15 - 30	< 15
*PST (%)	> 30	20 - 30	10 - 20	7 - 10	< 7
**Ds (g cm <sup>-3</sup> )	> 1,85	1,34 - 1,85	1,29 - 1,34	1,25 - 1,29	< 1,25
COT (g kg <sup>-1</sup> )	< 0,4	0,4 - 1,15	1,15 - 2,3	2,3 - 4	> 4
MOS (g kg <sup>-1</sup> )	< 0,7	0,7 - 2	2 a 4	4 a 7	> 7

**Fonte:** adaptado de Alvarez et al. (1999); \* Amorim et al. (2010); \*\*Kiehl (1979).

A classificação da fertilidade natural dos solos foi estimada para a camada superficial do solo por modelo paramétrico simplificado denominado Índice de Fertilidade Natural do Solo, utilizando linguagem algébrica através da calculadora *raster* do QGIS<sup>®</sup> (Equação 5).

$$IFNS = CA / NA \text{ (Eq.5)}$$

Onde: IFS = Índice de Fertilidade Natural do Solo; CA = somatória das classes de atributos: pH, P, Ca, Mg, Al, K, SB, H+Al, CTC Total, CTC efetiva, V, m, PST, DS, COT e MOS; NA = número de atributos.

Este modelo considera que variáveis/atributos têm como pesos os valores de 1 a 5 e a resultante classe 1 indica qualidade Muita Alta, classe 2 indica qualidade Alta, classe 3 infere classe Média, classe 4 infere classe Baixa e a classe 5 denota qualidade Muito Baixa.

No tratamento estatístico foi realizada a análise descritiva dos dados e o teste de normalidade utilizando o software RStudio<sup>®</sup> v.2023. Para avaliação foi utilizado a regressão clássica, conforme o modelo de regressão (Equação 5).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon_i \text{ (Eq.5)}$$



Onde:  $Y_i$  é uma observação da variável dependente;  $X_1, X_2, \dots, X_n$  são as variáveis independentes;  $\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$  são referidos como coeficientes de regressão correspondentes, e  $\epsilon_i$  é o erro associado às observações da variável dependente.

Para verificar se as amostras procediam de uma determinada distribuição de probabilidade, foram usados os testes de hipóteses não paramétricos de Anderson-Darling (1954), Shapiro-Wilk (1965) e Lilliefors (1967).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, da análise estatística descritiva das variáveis/atributos, observa-se o maior desvio padrão na Saturação por Al (m) seguida da Saturação de Base (V) e menor desvio nas variáveis K, Al, Ds, COT e MOS. A menor variabilidade ocorre na variável K seguida da Ds. A Saturação de Base (V) apresenta a maior média e mediana de alcance.

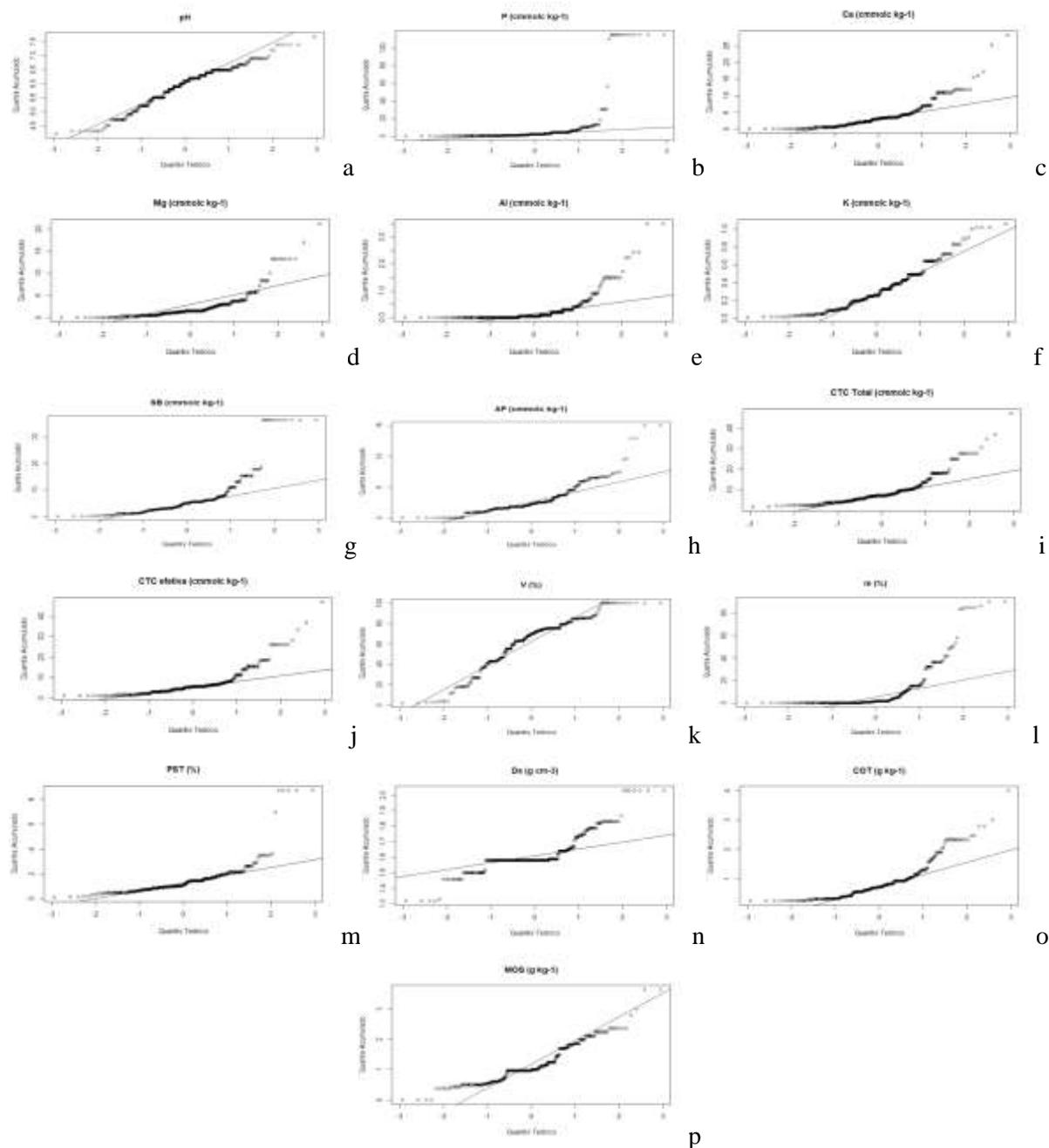
**Tabela 2** – Análise descritiva das variáveis/atributos

Atributo/Variável	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Desv. Pad.	Q1	Q3
pH em Água	4,20	5,99	6,20	7,70	0,66	5,50	6,50
P (cmolc kg <sup>-1</sup> )	0	8,65	2,00	115,00	14,48	0,50	4,00
Ca <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	0	4,31	3,00	28,20	3,77	1,40	4,47
Mg <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	0	2,03	1,50	8,30	2,86	0,60	2,94
Al <sup>3+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	0	0,25	0,05	3,50	0,51	0,00	0,30
K <sup>+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	0	0,36	0,33	1,02	0,23	0,12	0,49
SB (cmolc kg <sup>-1</sup> )	0,16	6,72	4,99	36,01	6,37	2,66	6,71
Ac. Pot. (H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup> ) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	0	2,85	2,30	15,06	3,29	1,50	3,69
CTC (pH 7,0) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	0,93	6,96	5,09	36,31	5,53	2,97	6,97
CTC (efetiva) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	1,81	9,57	7,29	36,31	7,33	5,07	10,17
V – Sat. Base (%)	1,82	62,86	69,77	100,00	24,67	46,50	78,45
m - Saturação por Al (%)	0	9,18	1,55	90,32	25,87	2,00	10,30
PST (%)	0,12	1,47	1,26	8,74	1,56	0,81	1,82
Ds (g cm <sup>-3</sup> )	1,32	1,61	1,58	2,03	0,46	1,58	1,64
COT (g kg <sup>-1</sup> )	0,25	0,87	0,73	4,00	0,59	0,43	1,00
MOS (g kg <sup>-1</sup> )	0	1,16	0,98	3,63	0,59	0,65	1,70

Nos boxplots dos quantis teórico e acumulado (Figura 2), observa-se uma distribuição normal nas variáveis pH, Mg, K, Ca, COT e MOS, já a variável P segue comportamento de distribuição não normal.



**Figura 2** – Boxplot das variáveis: (a) pH do solo (adimensional); (b) P (cmolc kg<sup>-1</sup>); (c) Ca<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (d) Mg<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (e) Al<sup>3+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (f) K<sup>+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (g) SB (cmolc kg<sup>-1</sup>); (h) Ac. Pot. (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (i) CTC (pH 7,0) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (j) CTC (efetiva) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (k) V – Sat. Base (%); (l) m - Saturação por Al (%); (m) PST (%); (n) Ds (g cm<sup>-3</sup>); (o) COT (g kg<sup>-1</sup>); (p) MOS (g kg<sup>-1</sup>).



Na Tabela 3 pode-se observar os resultados dos testes de normalidade de Anderson-Darling, Lilliefors e Shapiro-Wilk, em que se apresentam-se semelhantes entre si, o que leva a aceitar a hipótese de normalidade nos dados.

**Tabela 3** – Testes de normalidade

Atributo/Variável	Anderson-Darling		Lilliefors		Shapiro-Wilk	
	A	p-valor	D	p-valor	W	p-valor
pH em Água	2,377	4,98 e <sup>-3</sup>	0,081	6,53 e <sup>-2</sup>	0,974	4,26 e <sup>-5</sup>
P (cmolc kg <sup>-1</sup> )	78,05	2,20 e <sup>-16</sup>	0,371	2,20 e <sup>-16</sup>	0,342	2,20 e <sup>-16</sup>
Ca <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	35,33	2,20 e <sup>-16</sup>	0,249	2,20 e <sup>-16</sup>	0,598	2,20 e <sup>-16</sup>
Mg <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	17,33	2,20 e <sup>-16</sup>	0,213	2,20 e <sup>-16</sup>	0,815	2,20 e <sup>-16</sup>
Al <sup>3+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	45,98	2,20 e <sup>-16</sup>	0,306	2,20 e <sup>-16</sup>	0,549	2,20 e <sup>-16</sup>
K <sup>+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	7,22	2,20 e <sup>-16</sup>	0,109	2,73 e <sup>-6</sup>	0,914	5,47 e <sup>-9</sup>
SB (cmolc kg <sup>-1</sup> )	30,55	2,20 e <sup>-16</sup>	0,254	2,20 e <sup>-16</sup>	0,657	2,20 e <sup>-16</sup>
Ac. Pot. (H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup> ) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	13,76	2,20 e <sup>-16</sup>	0,199	2,20 e <sup>-16</sup>	0,819	2,20 e <sup>-16</sup>
CTC (pH 7,0) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	32,07	2,20 e <sup>-16</sup>	0,261	2,20 e <sup>-16</sup>	0,641	2,20 e <sup>-16</sup>
CTC (efetiva) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	22,66	2,20 e <sup>-16</sup>	0,224	2,20 e <sup>-16</sup>	0,734	2,20 e <sup>-16</sup>
V – Sat. Base (%)	6,63	2,29 e <sup>-13</sup>	0,142	2,20 e <sup>-16</sup>	0,934	3,44 e <sup>-7</sup>
m - Saturação por Al (%)	47,74	2,20 e <sup>-16</sup>	0,305	2,20 e <sup>-16</sup>	0,566	2,20 e <sup>-16</sup>
PST (%)	22,90	2,20 e <sup>-16</sup>	0,230	2,20 e <sup>-16</sup>	0,652	2,20 e <sup>-16</sup>
Ds (g cm <sup>-3</sup> )	25,41	2,20 e <sup>-16</sup>	0,291	2,20 e <sup>-16</sup>	0,810	2,20 e <sup>-16</sup>
COT (g kg <sup>-1</sup> )	15,50	2,20 e <sup>-16</sup>	0,185	2,20 e <sup>-16</sup>	0,822	2,20 e <sup>-16</sup>
MOS (g kg <sup>-1</sup> )	8,58	2,20 e <sup>-16</sup>	0,168	2,20 e <sup>-16</sup>	0,920	1,52 e <sup>-8</sup>

Na Tabela 4 pode-se observar a distribuição espacial das classes referentes aos parâmetros em estudo.

**Tabela 4** – Distribuição espacial dos atributos

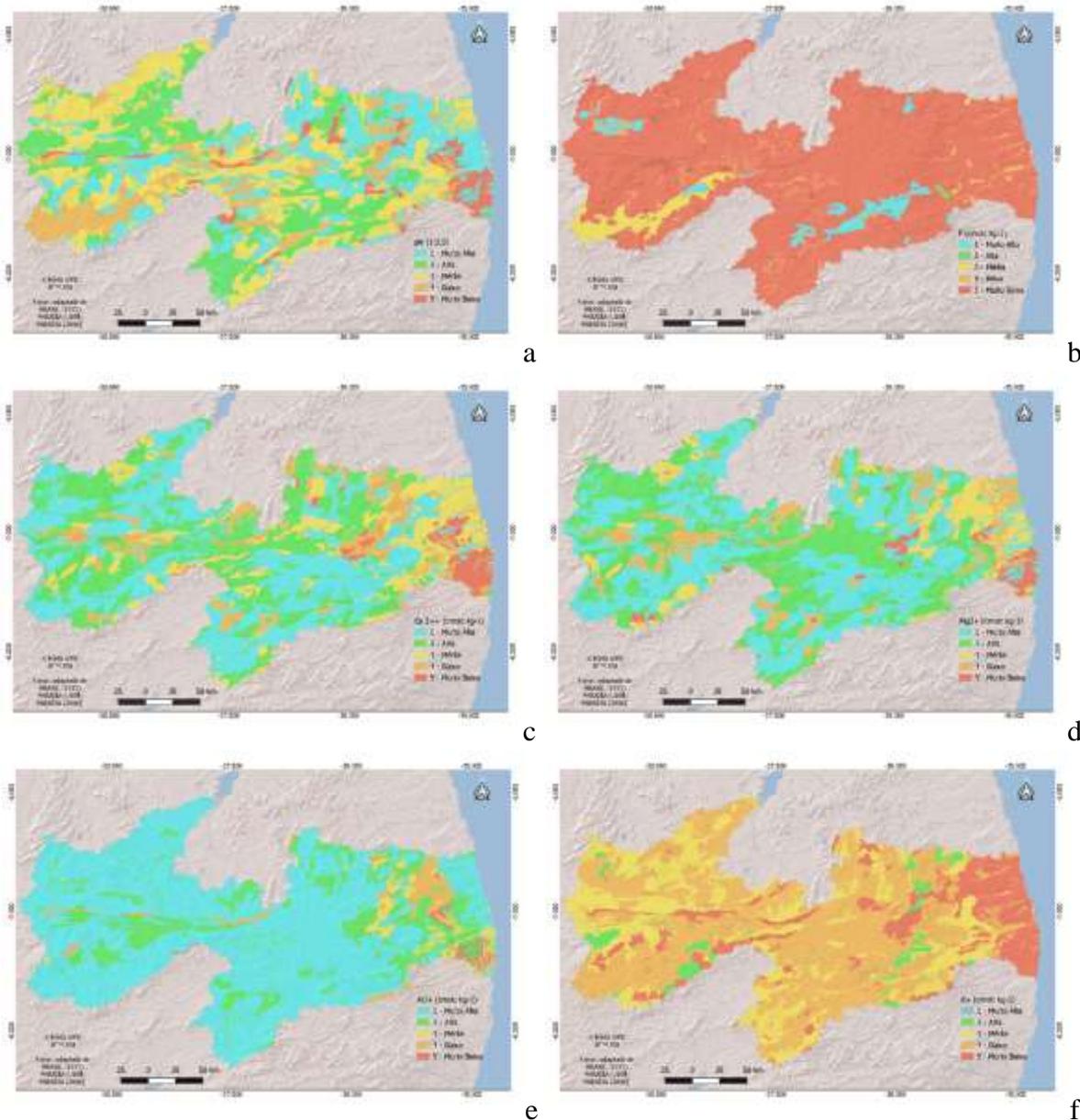
Variável/Atributo	Classe de Frequência									
	Muito Baixo (5)		Baixo (4)		Médio (3)		Alto (2)		Muito Alto (1)	
	Área (km <sup>2</sup> )	%								
pH em Água	3064,87	5,43	7.299,28	12,93	19.280,19	34,14	11.600,66	20,54	15.222,24	26,96
P (cmolc kg <sup>-1</sup> )	50.309,63	89,10	1.841,41	3,26	2.123,28	3,76	59,25	0,10	2.133,67	3,78
Ca <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	2.151,15	3,81	6.070,42	10,75	8.471,11	15,00	17.354,38	30,73	22.420,19	39,70
Mg <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	1.628,96	2,88	6.495,65	11,50	5.077,59	8,99	19.186,57	33,98	24.078,47	42,64
Al <sup>3+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	687,50	1,22	2.012,69	3,56	1.954,26	3,46	9.854,02	17,45	41.958,79	74,31
K <sup>+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	9.464,01	16,76	29.354,93	51,99	15.663,76	27,74	1.984,53	3,51	-	-
SB (cmolc kg <sup>-1</sup> )	1.504,86	2,67	6.277,69	11,12	7.034,84	12,46	17.234,05	30,52	24.415,80	43,24
Ac Pot (H+Al) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	1.120,94	1,99	5.022,54	8,89	17.799,30	31,52	24.033,04	42,56	8.491,42	15,04
CTC (pH 7,0) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	-	-	8.438,35	14,94	22.941,73	40,63	12.158,50	21,53	12.928,66	22,90
CTC (efetiva) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	-	-	8.348,88	14,79	8.445,55	14,96	24.909,66	44,11	14.763,16	26,14
V - Sat Bas (%)	3.569,46	6,32	1.855,04	3,29	6.603,14	11,69	28.015,95	49,61	16.423,66	29,09
m - Saturação por Al (%)	1.029,68	1,82	680,58	1,21	2.878,86	5,10	1.122,60	1,99	50.755,53	89,88
PST (%)	-	-	-	-	-	-	1.703,25	3,01	54.763,99	96,98
DS (g cm <sup>-3</sup> )	31.497,03	55,78	24.606,04	43,58	291,77	0,52	-	-	72,40	0,13
COT (g kg <sup>-1</sup> )	12.706,49	22,50	33.242,29	58,87	6.891,88	12,21	3.626,58	6,42	-	-
MOS (g kg <sup>-1</sup> )	14.976,52	26,52	37.031,41	65,58	4.459,31	7,90	-	-	-	-
IFNS	-	-	9.136,69	16,18	45.196,88	80,04	2.133,67	3,78	-	-

Pelos resultados obtidos, pode-se observar nas Figuras 3, 4 e 5 a distribuição espacial dos atributos dos solos. Nas Figuras 3a e 3b verifica-se a distribuição espacial do pH do solo e do P. Observa-se que, o pH se distribui em 47,50% (26.822,91 km<sup>2</sup>) das terras nas classes de



frequência Muito Alto e Alto, distribuída por todo o Estado; a frequência Médio contempla 34,14% da área; quanto as frequências Baixo e Muito Baixo apresentam-se em 18,36% dos solos com predominância no Litoral do Estado. Quanto ao P observa-se que 89,10% das terras apresentam-se na frequência Muito Baixo, seguida da Muito Alto (3,78%), Médio (3,76%), Baixo (3,26%) e Alto (10,0%).

**Figura 3** – (a) pH do solo (adimensional); (b) P (cmolc kg<sup>-1</sup>); (c) Ca<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (d) Mg<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (e) Al<sup>3+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (f) K<sup>+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>).



**Fonte:** adaptado de BRASIL (1972); PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2023).

Nas Figuras 3c e 3d observa-se a distribuição espacial do Ca e do Mg do solo. Observa-se que, o Ca se distribui em 70,44% (39.774,57 km<sup>2</sup>) das terras na frequência Muito Alto e Alto



distribuída por todo o interior do Estado; as demais classes de frequência Médio, Baixo e Muito Baixo contemplam 29,56% da área (16.692,67 km<sup>2</sup>); localizadas na região do Litoral. Quanto ao Mg, em sua maioria, se apresenta em 43.264,04 km<sup>2</sup> na classe de frequência Muito Alto e Alto em 76,62% das terras distribuídas em sua maioria pelo interior do Estado; seguida pelas classes de frequência Baixo, Médio e Muito Baixo representando 23,38% da área de estudo distribuídas na região do Litoral.

Pode-se verificar nas Figuras 3e e 3f a distribuição espacial dos atributos Al e do K do solo. Observa-se que, o Al se distribui em 91,76% (51.812,81 km<sup>2</sup>) das terras na frequência Muito Alto e Alto distribuída por todo o Estado; as demais classes de frequência Médio, Baixo e Muito Baixo contemplam 8,24% da área (4.654,44 km<sup>2</sup>); em áreas próximas ao Litoral. Quanto ao K, em sua maioria, se apresenta em 29.354,93 km<sup>2</sup> na classe de frequência Baixo em 51,99% das terras distribuídas em sua maioria no Litoral e menores áreas pelo interior do Estado; seguida pelas classes de frequência Médio e Baixo representando 44,50% (25.127,77 km<sup>2</sup>) da área de estudo distribuídas pelo interior semiárido. Constata-se somente 3,51% na classe de frequência Alto (1.984,53 km<sup>2</sup>) e não apresentando a classe Muito Alto de frequência.

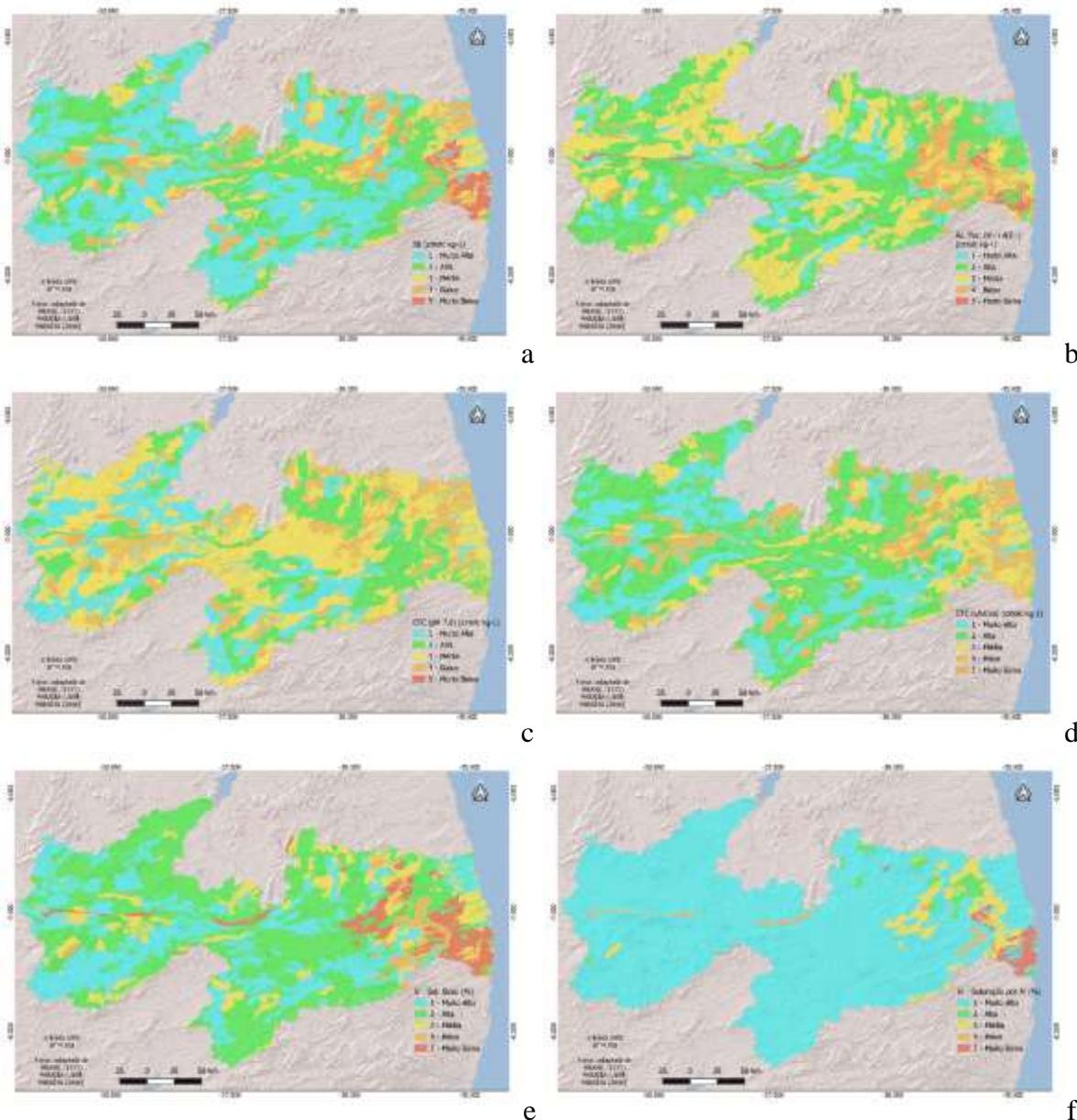
Através das Figuras 4a e 4b observa-se a distribuição espacial dos atributos SB e da Acidez Potencial do solo. Observa-se que, a SB se distribui em 73,76% (41.649,85 km<sup>2</sup>) das terras na frequência Muito Alto e Alto distribuída por todo o Estado; as demais classes de frequência Médio, Baixo e Muito Baixo contemplam 26,24% da área (14.817,39 km<sup>2</sup>) com predominância da frequência Muito Baixo em áreas do Litoral. Quanto a Acidez Potencial, em sua maioria, se apresenta em 41.832,34 km<sup>2</sup> nas classes de frequência Médio e Alto em 74,08% das terras distribuídas por todo o Estado; seguida pela classe de frequência Muito Alto representando 15,04% (8.491,42 km<sup>2</sup>) da área de estudo. Observa-se que 10,88% da área apresenta-se na classe de frequência Muito Baixo e Baixo (6.143,49 km<sup>2</sup>) localizadas próximas ao Litoral.

Pode-se verificar nas Figuras 4c e 4d a distribuição espacial dos atributos CTC Total e CTC efetiva do solo. Observa-se que, a CTC Total se distribui em 62,16% (35.100,24 km<sup>2</sup>) das terras na frequência Alto e Médio distribuída por todo o Estado; a classe de frequência Baixo contempla 14,94% da área (8.438,34 km<sup>2</sup>); e a classe de frequência Muito Baixo não apresenta área mapeada. Em relação a CTC efetiva, em sua maioria, se apresenta em 39.672,82 km<sup>2</sup> na classe de frequência Alto e Muito Alto em 70,26% das terras distribuídas por toda a área de estudo; seguida pelas classes de frequência Médio e Baixo representando 29,74% (16.794,42 km<sup>2</sup>) da área de estudo e sem representação da classe Muito Baixo de frequência.

Quanto as Figuras 4e e 4f verifica-se a distribuição espacial dos atributos Saturação de Base e Saturação por Al. Observa-se que, a Saturação de Base se distribui em 78,70% (44.439,61 km<sup>2</sup>) das terras na frequência Alto e Muito Alto distribuída por todo o Estado; as classes de frequência Baixo, Muito Baixo e Médio contemplam 21,30% da área (12.027,63 km<sup>2</sup>). Em relação a Saturação por Al, predomina por toda a área de estudo em 50.755,53 km<sup>2</sup> (89,88%) na classe de frequência Muito Alto; as demais classes de frequência Médio, Baixo e Muito Baixo representam 10,12% das terras localizadas com predominância próximas ao Litoral.



**Figura 4** – (a) SB (cmolc kg<sup>-1</sup>); (b) Ac. Pot. (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (c) CTC (pH 7,0) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (d) CTC (efetiva) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (e) V – Sat. Base (%); (f) m - Saturação por Al (%).



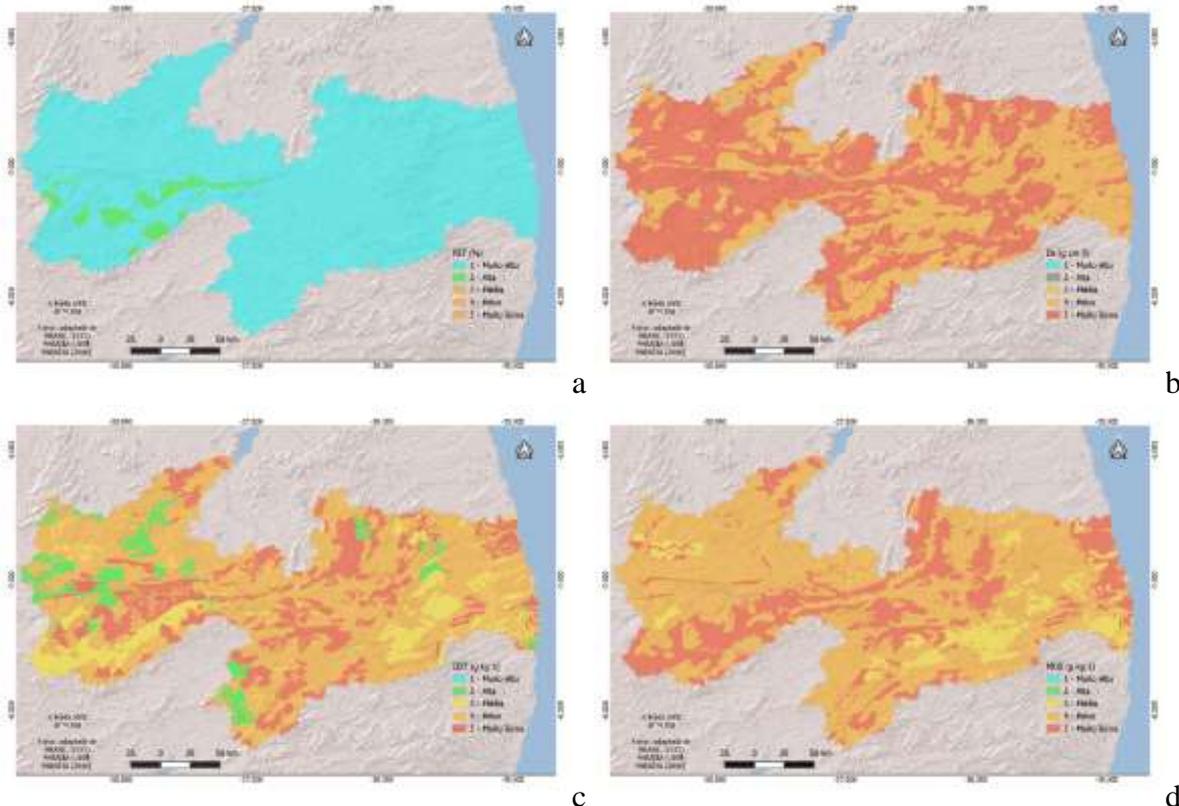
**Fonte:** adaptado de BRASIL (1972); PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2023).

Em relação aos atributos PST e Ds e sua distribuição espacial, verifica-se nas Figuras 5a e 5b que, o PST se distribui em sua maioria em 96,98% (54.763,99 km<sup>2</sup>) das terras na frequência Muito Alto por todo o Estado, seguida da classe de frequência Alto localizada na região do Sertão. Quanto ao Ds, predomina por toda a área do Estado na classe de frequência Baixo e Muito Baixo em 56.103,07 km<sup>2</sup> (99,36%).

Nas Figuras 5c e 5d pode-se verificar a distribuição espacial dos atributos COT e MOS, onde o COT se distribui em 81,37% (45.948,78 km<sup>2</sup>) das terras na frequência Muito Baixo e Baixo por todo o Estado, seguida da classe de frequência Médio e Alto em 18,63% das terras.

Quanto a MOS, se distribui por toda a área na classe de frequência Baixo e Muito Baixo em 52.007,93 km<sup>2</sup> (92,10%) seguida da classe de frequência Médio em 4.459,314 km<sup>2</sup> (7,90%).

**Figura 5** – (a) PST (%); (b) Ds (g cm<sup>-3</sup>); (c) COT (g kg<sup>-1</sup>); (d) MOS (g kg<sup>-1</sup>).



**Fonte:** adaptado de BRASIL (1972); PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2023).

Através da Figura 6, representativa da distribuição espacial da Fertilidade natural da camada superficial dos solos, e consultando a Tabela 5, pode-se verificar que, a classe de frequência Médio apresenta maior representatividade na área em 45.196,88 km<sup>2</sup> (80,04%) sob a diversidade de solos; a classe de frequência Alto distribuída em 2.133,67 km<sup>2</sup> (3,78%), a classe de frequência Baixo ocorre em 16,18% (9.136,68 km<sup>2</sup>) e as demais classes de frequência não apresentam ocorrência na espacialização.

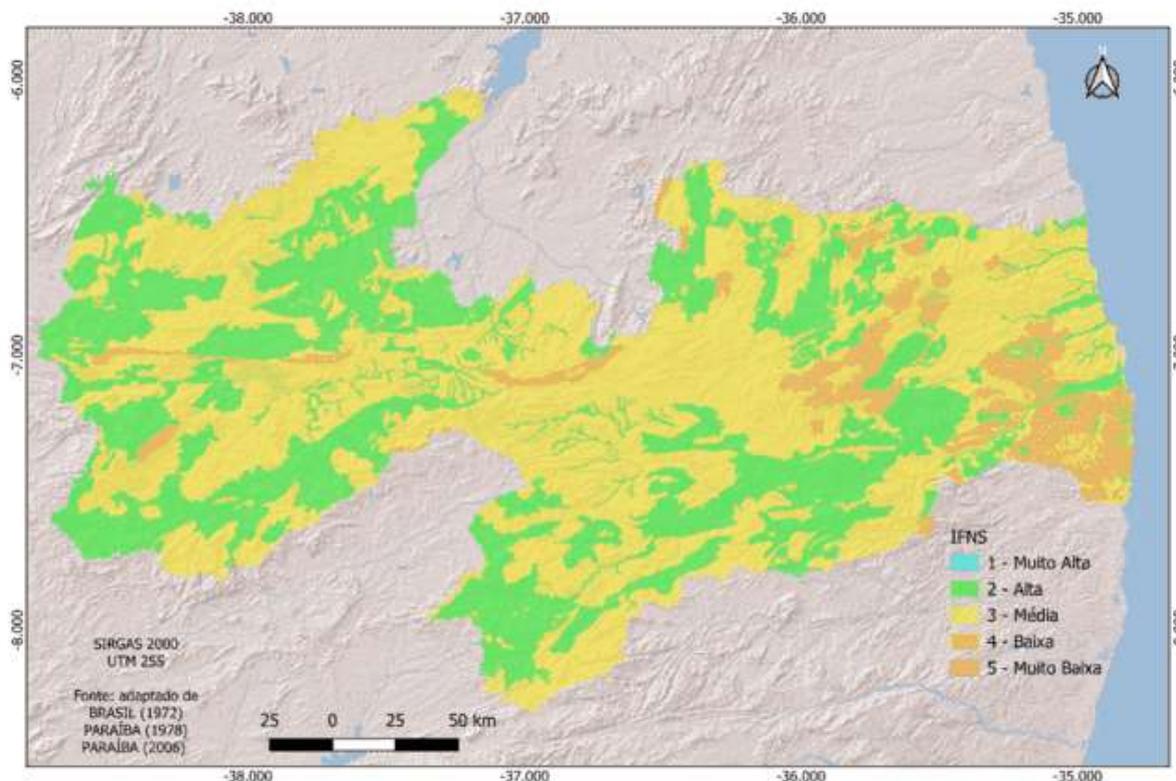
Observa-se que os pesos de maior frequência, no caso os atributos P, K, Ds, MOS e COT influenciam o resultado da distribuição espacial para a classe de frequência Médio, diferentemente dos demais atributos que influenciam para a classe de frequência Alto. A classe de frequência Baixo está representada pelos Afloramentos Rochosos na região semiárida, sob o Planalto da Borborema em Neossolos Regolíticos distróficos e sob os Argissolos Vermelhos no Litoral.

De acordo com Cavalcante et al. (2005), os Argissolos Vermelhos distróficos típicos apresentam a limitação ao uso agrícola decorrente da baixa fertilidade natural. Necessitam, portanto, de correção de acidez e adubação para a utilização agrícola intensiva. Quanto aos Neossolos regolíticos psamíticos solódicos, estes possuem boa reserva de minerais primários



de fácil intemperização que liberam elementos úteis às plantas, normalmente, são solos que apresentam baixos teores de nitrogênio e fósforo.

**Figura 6** – Fertilidade natural da camada superficial dos solos do Estado da Paraíba.



**Fonte:** adaptado de BRASIL (1972); PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2022).

No resultado do atributo P pode-se observar que, os maiores valores apresentam-se nas áreas dos Vertissolos. Silveira et al. (2006) afirmam que, os Neossolos Flúvicos e os Vertissolos, apesar de serem reconhecidos como pobres em P, destacam-se com teores altos concentração. De acordo com Francelino et al. (2005), a deficiência de P é apontada como uma das principais limitações encontradas nos solos do semiárido para o crescimento vegetal, e conforme Dadalto e Fullin (2001), torna-se necessário o fornecimento deste elemento, ao desenvolvimento adequado das plantas e produção das culturas.

Os resultados de frequência nas classes Médio a Muito Baixo do atributo de MOS, de acordo com Salcedo e Sampaio (2008), são explicados pelo baixo aporte de material orgânico e pelas condições climáticas que favorecem uma rápida decomposição do material já aportado. Chaves e Souza (2016) afirmam que, o aumento no teor de MOS poderá melhorar a retenção de água nos solos mais arenosos; além disso, favorece a melhoria da fertilidade dos solos, devido a disponibilização de elementos essenciais para as plantas como fósforo, magnésio, cálcio, enxofre e micronutrientes.



Vendruscolo et al. (2022), avaliando a fertilidade do Neossolo Litólico, no semiárido paraibano afirmaram que, a matéria orgânica influencia todos os atributos dos solos, por esse motivo é considerada como indicador chave para avaliar e monitorar a qualidade do solo, e para selecionar as práticas de manejo conservacionistas mais adequadas para aumentar seu teor no solo.

A influência da Ds nos resultados do índice de fertilidade com frequência mais baixa com valores máximos de  $2,03 \text{ g cm}^{-3}$ , pode ser explicado conforme Reinert et al. (2008), em que os valores críticos de densidade do solo encontram-se acima de  $1,85 \text{ g cm}^{-3}$ , por ocasionar modificações na morfologia das raízes, e, conseqüentemente, limitações ou impedimentos para o desenvolvimento do sistema radicular.

De acordo com Alvarenga et al. (1996) e Corsini e Ferraudó (1999), o aumento excessivo da densidade do solo provoca diminuição do volume total de poros, redução da permeabilidade e da infiltração de água, quebra dos agregados e aumento da resistência mecânica à penetração, ocasionando prejuízo ou comprometendo a qualidade física do solo. Desse modo, valores de Densidade entre  $1,27$  e  $1,57 \text{ g cm}^{-3}$  são restritivos ao crescimento radicular e à infiltração de água no solo.

Quanto aos atributos que influenciam para elevar a classe de frequência Alto e Muito Alto de fertilidade natural está o pH, que conforme Corrêa et al. (2003) valores de pH, próximo à neutralidade estão relacionados ao baixo grau de desenvolvimento pedogenético frequentemente observados em solos de regiões semiáridas. Conforme Portugal et al. (2010), estes contribuem para a diminuição nos teores de acidez potencial ( $\text{H}+\text{Al}^{3+}$ ) e acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ), que são considerados tóxicos às plantas. Outro atributo de maior influência são a CTC Total e CTC efetiva, que de acordo com Canellas et al. (2000), a capacidade de troca de cátions é bastante influenciada pelo conteúdo de carbono orgânico do solo, principalmente nos horizontes superficiais.

A SB é um dos atributos dos solos que apresenta contribuição para a frequência Alto e Muito Alto de fertilidade natural. Para Malavolta (2006), de modo geral, a fertilidade química dos solos aumenta com o valor de saturação por bases, a qual serve para classificação dos mesmos. Os baixos valores de  $\text{Al}^{3+}$  trocável resultaram em maiores valores de soma de bases, capacidade de troca de cátions e saturação por bases. Resultado similar encontrado por Silva (2013).

Quanto a classe de frequência Média de Fertilidade Natural dos Solos, observa-se que predomina em sua maioria sob os Luvisolos e Neossolos Litólicos nas regiões interiores do Estado e no Litoral Norte a classe Média predomina sob os Neossolos Quartzarênicos.

De acordo com Cavalcante et al. (2005), os Neossolos Quartzarênicos órticos típicos, afirmam que suas principais limitações à sua utilização agrícola, são a muito baixa fertilidade natural, baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, determinada pela sua textura arenosa, que inclusive dificulta as práticas de adubação que visam a serem feitas. Demonstrando concordância com os resultados obtidos por este trabalho.

Os Neossolos Litólicos eutróficos típicos possuem fortes limitações ao uso agrícola, provocados pela pedregosidade, rochosidade e pequena profundidade destes solos (Cavalcante



et al., 2005), no entanto, ocorrem em toda a zona semiárida, são bem drenados, moderadamente ácidos, de saturação de bases alta e saturação com alumínio praticamente nula (BRASIL, 1972).

Conforme Cavalcante et al. (2005), os Luvisolos crômicos órticos típicos apresentam pequena espessura e susceptibilidade à erosão, no entanto, de acordo com BRASIL (1972), compreendem solos com horizonte B textural, não hidromórficos, com argila de atividade alta. Possuem altas somas de bases (valor *S*) e saturação de bases (valor *V*%), são bem drenados, cuja reação (pH) varia de moderadamente ácida a praticamente neutra, apresentam textura média, com teores de argila entre 15 e 35%, apresentam fertilidade natural alta, porém os teores de matéria orgânica e fósforo são baixos.

## CONCLUSÃO

O uso da técnica de pedotransferência proporcionou resultados satisfatórios aliado ao uso das geotecnologias, a geoespacialização dos atributos dos solos foi realizada com rapidez e precisão.

O modelo paramétrico simplificado do índice de fertilidade natural do solo permitiu classificar, mapear e identificar os atributos mais limitantes dos solos.

Embora a metodologia utilizada neste trabalho apresente limitações, permitiu levantar informações de suma importância sobre o diagnóstico físico conservacionista da área, estimando dados quantitativos da fertilidade dos solos.

Os testes de normalidade de Anderson-Darling, Lilliefors e Shapiro-Wilk apresentaram-se semelhantes entre si.

Os atributos dos solos considerados limitantes, a fertilidade apresentou baixos teores de nutrientes P e K, baixos teores físicos de *D<sub>s</sub>* e baixos teores orgânicos de COT e MOS.

## AGRADECIMENTOS

À Fapesq e ao CNPq.

## REFERÊNCIAS

ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.319-326, 1996.

ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. p.26-28.

AMORIM, J. R. A.; CRUZ, M. A. S.; RESENDE, R. S.; BASSOI, L. H.; SILVA FILHO, J. G. **Espacialização da Porcentagem de Sódio Trocável do solo no Perímetro Irrigado Califórnia, em Canindé de São Francisco, Sergipe**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2010. 19p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 61).



ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A test of goodness of t. **Journal of American Statistical Association**, v.49, p.765-769, 1954. <https://doi.org/10.1080/01621459.1954.10501232>

ANDRADE, S. F. DE. **Mapeamento digital da fertilidade do solo das regiões Norte, Noroeste e Serrana do Estado do Rio de Janeiro**. 181f. Tese (Doutorado em Geoquímica Ambiental). Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2010.

ANDRADE, S. F. DE; MENDONÇA-SANTOS, M. DE L. Predição da fertilidade do solo do polo agrícola do Rio de Janeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1386-1395, 2016. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900037>

BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey report in Brazil. **Geoderma**, v.139, p.90-97, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.005>

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro. (Boletins DPFs-EPE-MA, 15 - Pedologia 8). Convênio MA/CONTA/USAID/BRASIL, 1972.

BRUINSMA, J. (Ed.). **World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective**. London: Earthscan Publications, 2003. 432p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/y4252e/y4252e.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2023.

CAVALCANTE, F. de S.; DANTAS, J. S.; SANTOS, D.; CAMPOS, M. C. C. Considerações sobre a utilização dos principais solos no estado da Paraíba. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v.4, n.8, p.1-10, 2005.

CHAVES, L. H. G.; SOUZA, R. S. DE. Avaliação da fertilidade dos solos da região produtora de abacaxi do Estado da Paraíba. **Enciclopédia Biosfera**, v.13, n.24, p.128-134, 2016. [https://doi.org/10.18677/EnciBio\\_2016B\\_011](https://doi.org/10.18677/EnciBio_2016B_011)

CORREA, M. M.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; RUIZ, H. A.; BASTOS, R. S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos da região das várzeas de Sousa-PB. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.2, p.311-324, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200011>

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.289-298, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000200017>



DADALTO, G. G.; FULLIN, E. A. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo**. 4ª aproximação. Vitória, ES: SEEA/INCAPER, 2001. 266p.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, D. C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T.; OLIVEIRA, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.41, n.1, p.8-19, 2011. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i1.8351>

DOBOS, E.; MICHELI, E.; BAUMGARDNER, M. F.; BIEHL, L.; HELT, T. Use of combined digital elevation model and satellite data for regional soil mapping. **Geoderma**, v.97, p.367-391, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00046-X)

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento pedológico detalhado (Escala 1:5.000) e estoque de carbono orgânico do solo da Floresta Nacional Restinga de Cabedelo, municípios Cabedelo e João Pessoa, PB**. (Org). COELHO, M. R. et al. Rio de Janeiro, 2017. 122p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/Embrapa Solos).

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. SANTOS et al. 5a. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 359p.

ESRI. Mapa Topográfico Mundial. Disponível em: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=30e5fe3149c34df1ba922e6f5bbf808f>. Acesso em: junho de 2023.

FERNANDES, V. L. B. **Levantamento do nível de fertilidade dos solos das vilas colonizadas da Serra do Mel**. ESAM/Fundação Guimarães Duque, 1991. 66p. (Coleção Mossoroense).

FERREIRA, C. E. G.; PRADO, R. B.; BENITES, V. de M.; POLIDORO, J. C. Proposta metodológica para o mapeamento da demanda de potássio para o Sudoeste Goiano. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 32, 2009, Fortaleza. Anais...Fortaleza, 2009.

FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; FERREIRA, M. E. **Avaliação da fertilidade empregando o sistema IAC de análise de solo**. Jabotical: FCAV, 1990. 94p.

FILIPPINI ALBA, J. M. **Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações**. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p.84-95.



FRANCELINO, M. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; RESENDE, M. Elaboração de um sistema de classificação da capacidade de suporte em ambiente semiárido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.1, p.83-91, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000100013>

FRANCISCO, P. R. M. **Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas**. 122f. Dissertação (Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2010.

FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. DE B.; LIMA, E. R. V. DE. Classificação de terras para mecanização agrícola e sua aplicação para o Estado da Paraíba. **Revista Educação Agrícola Superior**, v.28, n.1, p.30-35, 2013. <https://doi.org/10.12722/0101-756X.v28n01a05>

FREGONEZI, G. A. F.; PRETE, R. O.; ALMEIDA, L. H. C. Avaliação econômica da correção de solos pelo método tradicional e pela agricultura de precisão. **Synergismus Scientifica**, v.9, n.1, p.484-497, 2014.

HENGL, T. **A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables**. Luxembourg: European Commission, 2007.

HENGL, T.; HEUVELINK, G. B. M.; ROSSITER, D. G. About regression-kriging: From equations to case studies. **Computers & Geosciences**, v.33, p.1301-1315, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.001>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malhas territoriais. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 10 de abril de 2022.

KIEHL, E. J. Manual de Edafologia: Relação Solo-Planta. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.

LAGACHERIE, P. **Digital soil mapping: a state of the art**. In: HERTMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. Digital soil mapping with limited data. Ed. Springer, 2008. p.3-14.

LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B. Chapter 1. Spatial soil information system and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. **Developments in Soil Science**, v.31, p.3-22, 2007. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(06\)31001-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31001-X)



LILLIEFORS, H. W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. **Journal of the American Statistical Association**, v.62, n.318, p.399-402, 1967. <https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10482916>

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 638p.  
MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v.117, p.3-52, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)

MONTANARI, R.; PANACHUKI, E.; LOVERA, L. H.; CORREA, A. R.; OLIVEIRA, I. S.; QUEIROZ, H. A.; TOMAZ, P. K. Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região do ecótono Cerrado-Pantanal, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.2, p.385-396, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140215>

MOREIRA, A.; GONÇALVES, J. R. P.; PLÁCIDO JÚNIOR, C. G. **Mapas da distribuição aproximada da fertilidade dos solos do Estado do Amazonas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2005. 21p. (Embrapa Amazônia Ocidental. Documentos, 40).

NAUMOV, A. S.; OLIVEIRA, R. P. de; PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. Balanced fertilization for sustainable development of agriculture in the savannas of South America: towards a geographical approach. **Geography, Environment, Sustainability**, v.5, n.4, p.84-95, 2012. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2012-5-4-84-95>

PARAÍBA. Governo do Estado. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. CEPA–PB. **Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba**. Relatório ZAP-B-D-2146/1. UFPB-EletoConsult Ltda., 1978. 448p.

PARAÍBA. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente. Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba, AESA. **PERH-PB: Plano Estadual de Recursos Hídricos: Resumo Executivo & Atlas**. Brasília, 2006. 112p.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, v.67, p.1-85, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60513-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60513-1)

PORTUGAL, A. F.; JUNCKSH, I.; SCHAEFER, C. E. R. G.; NEVES, J. C. L. Estabilidade de agregados em Argissolo sob diferentes usos, comparado com mata. **Revista Ceres**, v.57, n.4, p.545-553, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000400018>

PRADO, R. B.; BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; POLIDORO, J. C.; DART, R. O.; NAUMOV, A. **Mapping potassium availability from limited soil profile data in Brazil**. In: HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. (Ed.). Digital soil mapping with limited data. Wageningen: Springer, 2008. p.91-101. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8592-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8592-5_8)



PRADO, R. B.; FERREIRA, C. E. G.; BENITES, V. de M. **Proposta metodológica para mapeamento da demanda potencial de potássio para áreas agrícolas do sudoeste goiano, considerando uso, manejo e textura dos solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 32p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 195). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/79152/1/BPD-195-Proposta-map-sudoeste-goiano.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2023.

PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; POLIDORO, J. C.; BENITES, V. de M.; BALIEIRO, F. C.; FERREIRA, C. E. G. Mapeamento da disponibilidade de cálcio e magnésio em solos do Sudoeste Goiano. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 31, 2007, Gramado. Anais...Gramado, 2007.

QGIS. Development Team. 2023. QGIS Geographic Information System. OpenSource Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.

RAMALHO FILHO, A.; PEREIRA, E. G.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 2.a ed. Rio de Janeiro: SUPLAN/EMBRAPA-SNLCS, 1993. 57p.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.32, n.5, p.1805-1816, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>

SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. **Dinâmica da matéria orgânica no bioma caatinga**. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Eds). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo**. 2. ed. Porto Alegre, RS: Metrópole, 2008. p.419-441.

SHAPIRO, A. S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v.52, n.3/4, p.591-611, 1965. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>

SILVA, D. R. DA. **Qualidade do solo em diferentes condições de uso no semiárido paraibano**. 55f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) . Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2013.

SILVEIRA, M. M. L.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, E. V. S. B. Distribuição de fósforo em diferentes ordens de solo do Semiárido da Paraíba e Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.2, p.281-291, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000200009>

TURETTA, A. P. D.; BACA, J. F. M.; PRADO, R. B.; BALIEIRO, F. DE C.; OLIVEIRA, R. P. DE; POLIDORO, J. C.; BENITES, V. DE M. **Iniciativas para o mapeamento do potencial**



**de fertilidade dos solos Brasileiros.** Embrapa Solos. Rio de Janeiro, 2013. 10p. (Comunicado Técnico, 70).

VENDRUSCOLO, J.; BARBOSA, M. A. DA S.; ABRANTES, E. G. DE; SOUZA, R. F. DA S.; FERREIRA, K. R.; MARIN, A. M. P.; SOUZA, E. F. M. DE. Uso de geotecnologias para o manejo da fertilidade do Neossolo Litólico em agroecossistema familiar, no semiárido paraibano. **Revista Científica Multidisciplinar**, v.3, n.10, p.1-16, 2022. <https://doi.org/10.47820/recima21.v3i10.2095>

VETTORATO, J. A. **Mapeamento da fertilidade do solo utilizando sistema de informação geográfica.** Dissertação (Mestrado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrônômicas. Universidade do Estado de São Paulo. Botucatu, 2003.

## HISTÓRICO

**Submetido:** 13 de Julho de 2024.

**Aprovado:** 23 de Março de 2024.

**Publicado:** 09 de Maio de 2024.

## DADOS DO(S) AUTOR(ES)

### Paulo Roberto Megna Francisco

Eng. Agrícola, Msc. em Manejo e Conservação do Solo e Água, Doutorando em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba, Brasil. Rua Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, Campina Grande, Paraíba, Brasil, CEP: 58429-900.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5062-5434>

**Lattes:** <http://lattes.cnpq.br/4160342080398080>

**E-mail:** [paulomegna@gmail.com](mailto:paulomegna@gmail.com)

### Djail Santos

Eng. Agrônomo, Doutor em Ciência do Solo, Professor da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Areia, Paraíba, Brasil. Rodovia, PB-079, Areia, Paraíba, Brasil, CEP: 58397-000.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2207-3115>

**Lattes:** <http://lattes.cnpq.br/4087698885827491>

**E-mail:** [djail.santos@academico.ufpb.br](mailto:djail.santos@academico.ufpb.br)

### Flávio Pereira de Oliveira

Eng. Agrônomo, Doutor em Ciência do Solo, Professor da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Areia, Paraíba, Brasil. Rodovia, PB-079, Areia, Paraíba, Brasil, CEP: 58397-000.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7968-6145>

**Lattes:** <http://lattes.cnpq.br/9348151205974051>

**E-mail:** [flavio.oliveira@academico.ufpb.br](mailto:flavio.oliveira@academico.ufpb.br)

### Viviane Farias Silva

Eng. Agrícola, Msc. e Dra. em Eng. Agrícola Universidade Federal de Campina Grande. Professora Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba, Brasil. Rua Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, Campina Grande, Paraíba, Brasil, CEP: 58429-900.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5891-0328>

**Lattes:** <http://lattes.cnpq.br/5011520274887172>



**E-mail:** [viviane.farias@professor.ufcg.edu.br](mailto:viviane.farias@professor.ufcg.edu.br)

**Raimundo Calixto Martins Rodrigues**

Eng. Agrônomo, Dr. em Eng. Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande. Professor Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), São Cristóvão, Maranhão, Brasil. R. Paulo VI, s/n, Cidade Universitária, São Cristóvão, Maranhão, CEP: 65055-000

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8437-7857>

**Lattes:** <http://lattes.cnpq.br/5197092679324068>

**E-mail:** [calixto\\_80@hotmail.com](mailto:calixto_80@hotmail.com)

**COMO CITAR O ARTIGO - ABNT**

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; OLIVEIRA, F. P. DE; SILVA, V. F.; RODRIGUES, R. C. M. Índice de fertilidade natural da camada superficial dos solos do Estado da Paraíba modelado através de geotecnologias. **Revista GeoUECE**, Fortaleza (CE), v. 3, n. 24, e202401, 2024.