

## Geoestatística, krigagem e multivariada de atributos físicos de um Latossolo sob pastagem

Conhecer a distribuição espacial de atributos do solo e planta é indispensável para o manejo racional das atividades agropecuárias, e para isto pode ser utilizado indicadores de qualidade física do solo. Este trabalho teve por objetivo de identificar a estrutura de dependência espacial de atributos físicos do solo e correlacionar pela análise de componentes principais com a produtividade de pastagens. O experimento foi conduzido no município de Corrente-PI. Para o mapeamento dos atributos físicos do solo e da produtividade da pastagem foram avaliados 78 pontos, referentes aos pontos de cruzamento de uma malha amostral com intervalos regulares de 10 m. A hipótese de normalidade dos dados foi testada na estatística descritiva pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e a dependência espacial analisada por meio de ajustes de semivariogramas. Atributos indicadores de qualidade física do solo como: densidade do solo, porosidade total, resistência do solo a penetração, umidade gravimétrica apresentaram grau de dependência espacial forte em área sobre pastagem degradada, sugerindo que nas condições estudadas, essas variáveis são as principais responsáveis pela espacialização da produtividade da matéria seca da pastagem que houve grau de dependência espacial moderada. Os atributos físicos do solo sob pastagem degradada apresentaram estrutura de dependência espacial em todas as camadas estudadas. A Técnica de Krigagem demonstrou ser uma alternativa viável par interpolação de dados em locais não amostrados na área de estudo.

**Palavras-chave:** Geoestatística; Krigagem; Manejo do solo; Tomada de decisão.

## Geostatistics, kriging and multivariate physical attributes of an Oxisol under pasture

Knowing the spatial distribution of soil and plant attributes is essential for the rational management of agricultural activities, and for this purpose indicators of soil physical quality can be used. The objective of this work was to identify the structure of spatial dependence of soil physical attributes and to correlate them through principal component analysis with pasture productivity. The experiment was conducted in the municipality of Corrente-PI. For the mapping of soil physical attributes and pasture productivity, 78 points were evaluated, referring to the crossing points of a sample mesh with regular intervals of 10 m. The hypothesis of data normality was tested in descriptive statistics using the Kolmogorov-Smirnov test and spatial dependence was analyzed using semivariogram adjustments. Soil physical quality indicator attributes such as: soil bulk density, total porosity, soil resistance to penetration, gravimetric moisture showed a strong degree of spatial dependence on degraded pasture area, suggesting that under the conditions studied, these variables are the main factors responsible for spatialization of pasture dry matter productivity that there was a moderate degree of spatial dependence. Soil physical attributes under degraded pasture showed spatial dependence structure in all layers studied. The Kriging Technique proved to be a viable alternative for data interpolation in unsampled locations in the study area.


**Keywords:** Geostatistics; Kriging; Soil management; Decision making.


Topic: **Ciências do Solo**


Received: **04/06/2022**


Approved: **27/06/2022**


Reviewed anonymously in the process of blind peer.


**Marco Aurélio Barbosa Alves**   
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/762346775911250>  
<http://orcid.org/0000-0003-3133-6060>  
[marcoarelio.monitor@gmail.com](mailto:marcoarelio.monitor@gmail.com)

**Fernando Silva Araújo**   
Universidade Estadual do Piauí, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/8337235506515162>  
<http://orcid.org/0000-0003-1150-5867>  
[fernandoaraujo@phb.uespi.br](mailto:fernandoaraujo@phb.uespi.br)

**Erica Paloma Viana Maia**   
Universidade Federal do Ceará, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/469261026262259>  
<http://orcid.org/0000-0002-6026-5196>  
[erickapaloma.agronomia@gmail.com](mailto:erickapaloma.agronomia@gmail.com)

**Wesley dos Santos Souza**   
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/4286185972062563>  
<http://orcid.org/0000-0002-5186-6627>  
[agrowesley95@gmail.com](mailto:agrowesley95@gmail.com)

**Jenilton Gomes da Cunha**   
Universidade Federal do Piauí, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/2273843380199883>  
<http://orcid.org/0000-0003-4110-6605>  
[jeniltongomes@hotmail.com](mailto:jeniltongomes@hotmail.com)

**Ana Paula Silva de Almeida**   
Faculdade de Engenharia Agrícola, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/1146627353951742>  
<http://orcid.org/0000-0003-1927-4709>  
[anapalmeidajus@gmail.com](mailto:anapalmeidajus@gmail.com)



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.006.0001

### Referencing this:

ALVES, M. A. B.; ARAÚJO, F. S.; MAIA, E. P. V.; SOUZA, W. S.; CUNHA, J. G.; ALMEIDA, A. P. S.. Geoestatística, krigagem e multivariada de atributos físicos de um Latossolo sob pastagem. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.13, n.6, p.1-11, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.006.0001>

## INTRODUÇÃO

A medida que se expande a produção agropecuária em regiões semiáridas do Brasil, aumenta-se também a necessidade de monitoramento dos recursos naturais como solo, água e biodiversidade. Neste sentido, a predominância de degradação dos solos nos campos de produção agropecuária pode estar associada a exploração além da capacidade de suporte animal e a ausência de práticas conservacionistas em pastagens (ZÚÑIGA et al., 2015; RAUBER et al., 2018).

Os solos necessitam em sua maioria de manejo específico em virtude de os mesmos serem resultante da interação de fatores geológicos, biológicos, topográficos e climáticos, entre outros, que juntos conferem características próprias. Por isso, em áreas manejadas, além da variabilidade natural, existem heterogeneidades que são adicionadas ao solo; dentre essas, aquelas oriundas do manejo (CARNEIRO et al., 2017; TAVATI et al., 2020).

Em sistemas pastoris a sustentabilidade é fruto de bom estado de conservação da pastagem e equilíbrio dos atributos do solo. Os atributos físicos mais utilizados como indicadores de qualidade do solo são: resistência do solo à penetração (BENEVENUTE et al., 2020; COLOMBI et al., 2018; SOUZA, 2012); densidade do solo, umidade gravimetria (AWAL et al., 2019), densidade de partículas (SCHJONNING et al., 2017) e porosidade total (RIBEIRO et al., 2016).

O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo é importante para o manejo racional dos recursos naturais inerentes as atividades agropecuárias (BITENCOURT et al., 2016). Isso é possível com o uso de técnicas geoestatísticas, que possibilitam a interpretação dos resultados, com base em valores obtidos com modelos matemáticos e confecção de semivariogramas (VIEIRA, 2000; JOHN et al., 2021). Neste sentido, na literatura autores têm demonstrado dependência espacial de atributos físicos do solo e planta (SANCHES et al., 2019; TAVATI et al., 2020), além disso, correlações de produtividade de gramíneas com atributos físicos do solo (MONTANARI et al., 2015; GUIMARÃES et al., 2016; BENEVENUTE et al., 2020; CORNÉLIO et al., 2021).

Para Usowicz et al. (2022), o uso da Krigagem com a Geoestatística interpola valores de pontos não amostrado e com isso além das informações do semivariogramas é possível gerar mapas de isolinhas, o que facilita a interpretação visual dos atributos do solo e das plantas. A krigagem é uma técnica necessária e útil em estudo de variabilidade espacial de atributos do solo (LI et al., 2022).

O conhecimento da distribuição dos atributos físicos do solo é primordial, uma vez que o equilíbrio destes é essencial para o desenvolvimento das plantas. Com a hipótese de que a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo influencia na produtividade de massa seca de pastagem, este estudo tem como objetivo identificar e avaliar a estrutura de dependência espacial de atributos físicos do solo, correlacionando-os com a produtividade da pastagem com intuito de determinação de zonas de manejo específico.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Descrição da área de estudo

O estudo foi realizado na área experimental da Universidade Estadual do Piauí, campus Deputado Jesualdo Cavalcanti Barros, município de Corrente, PI (10°26' de latitude sul e 45°09' de longitude oeste, 438 m de altitude). O clima é o tropical chuvoso (Aw') pelo critério de classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013). A área é de topografia suave ondulada e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média. A área é ocupada por capim do gênero andropogon, obtido através de plantio convencional e utilizado para pastejo de bovinos.

A princípio determinou-se uma malha amostral com pontos de cruzamento, respeitando intervalos regulares de 10 m em área de 0,5 ha, perfazendo o total de 78 pontos amostrais (Fig.1). Em cada ponto foi obtido uma cota com o auxílio de um teodolito e georreferenciados com GPS.

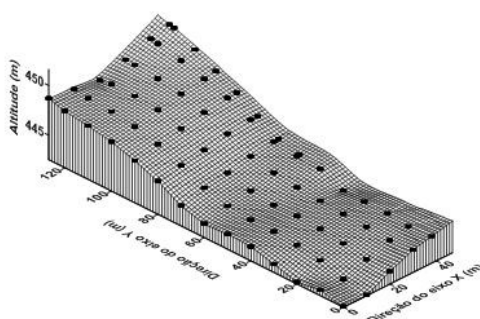


Figura 1: Grid amostral da área de estudo.

### Atributos físicos do solo

Para conhecimento da situação física do solo, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas. Amostras deformadas para análises granulométrica (areia, silte e argila), densidade de partículas e umidade gravimétrica e indeformadas para determinação da densidade do solo. A coleta das amostras foi realizada nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20m.

A textura do solo foi determinada em laboratório pelo método pipeta, utilizando solução de NaOH 0,1N como dispersante químico e agitação com aparato de baixa rotação, com base no princípio da lei de Stooks. O silte foi calculado por diferença. A densidade do solo foi obtida pela relação de peso seco do solo e volume do cilindro. A densidade de partículas determinada pelo método do balão volumétrico. O teor de água no solo foi obtido pelo método gravimétrico em amostras deformadas (TEIXEIRA et al., 2017).

Para obtenção dos dados da resistência do solo à penetração, foi utilizado um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar com ângulo de cone de 30°. Para transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em resistência à penetração foi utilizada a fórmula de Stolf (1991), a seguir:

$$R = \frac{\left[ Mg + mg + \left( \frac{M}{M+m} \times \frac{Mg \times h}{x} \right) \right]}{A} \quad (\text{Equação 01})$$

Em que: **R** é a resistência à penetração, kgf cm<sup>-2</sup> (kgf cm<sup>-2</sup> \* 0,098 = MPa); **M** a massa do êmbolo, 4 kg (Mg - 4 kgf); **m** a massa do aparelho sem êmbolo, 3,2 kg (Mg - 3,2 kgf); **h** a altura de queda do êmbolo, 40 cm; **x** a penetração da haste do aparelho, cm/impacto, e **A** a área do cone, 1,29 cm<sup>2</sup>. Posteriormente, os dados foram classificados, conforme

Arshad et al. (1996) em: muito baixa: 0,01 RP < 0,1 MPa; baixa: 0,1 RP < 1,0 MPa; moderada: 1,0 RP < 2,0 MPa; alta: 2,0 RP < 4,0 MPa; muito alta: 4,0 RP < 8,0 MPa; e extremamente alta: RP > 8,0 MPa.

## Pastagem

Para o mapeamento da produtividade da pastagem foram avaliados 78 pontos, referentes aos pontos de cruzamento da malha amostral. Para quantificação em toneladas de massa seca produzida por hectare foi amostrada uma área equivalente a 1,0 metro quadrado, partindo do centro do ponto de cruzamento da malha. O corte da pastagem foi realizado de forma manual e o material foi processado em laboratório com desidratação em estufa de circulação de ar forçada.

## Estatística descritiva, geoestatística, krigagem e análise multivariada

Os atributos físicos do solo e a massa seca da pastagem foram avaliados por meio da análise estatística descritiva, geoestatística e Krigagem. Na estatística descritiva foram calculados: média, mediana, variância, valores máximos e mínimos, o coeficiente de variação, o coeficiente de assimetria e o coeficiente de curtose e a hipótese de normalidade testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, por meio do programa computacional, University Edition (SAS, 2016).

A dependência espacial foi analisada por meio de ajustes de semivariogramas (VIEIRA, 2000), com base na pressuposição de estacionalidade da hipótese intrínseca, a qual é estimada por:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (\text{Equação 02})$$

em que N (h) é o número de pares experimentais de observações Z(x<sub>i</sub>) e Z (x<sub>i</sub> + h) são separados por uma distância h. O semivariograma é representado pelo gráfico  $\hat{\gamma}(h)$ , versus h.

A escolha do melhor modelo ajustado aos variogramas baseou-se na soma de quadrados dos resíduos (SQR) e no coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>). Posteriormente, tais modelos foram usados no desenvolvimento de mapas de isolinhas utilizando a técnica de Krigagem ordinária. Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, foi considerado o maior valor do coeficiente de correlação obtido pelo método de validação cruzada. Para elaboração dos mapas de distribuição espacial das variáveis, foi utilizado o programa Surfer 9.0 (Golden Software, 1999).

A classificação do grau de dependência espacial (Co/(Co+C), foi feita de acordo com Cambardella et al. (1994), que estabelece que se a relação for = 25 %, é considerada como dependência forte; se for entre 25 e 75 %, dependência moderada; e se for > 75 %, dependência fraca.

Os dados também foram submetidos a estatística multivariada aplicando a técnica de análise de componentes principais (ACP), para a escolha do número de componentes foi adotado o critério de seleção daquelas que apresentaram autovalores acima de 1,00 a confecção gráfica foi realizada pelo software R Studio.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Estatística descritiva

Os valores de média e mediana nas camadas de 0-0,10m e de 0,10-0,20m, estão próximos, da mesma

forma os coeficientes de assimetria encontram-se próximos de zero, denotando distribuição simétrica dos dados, exceto para granulometria (areia total, argila e silte) (Tabela 1).

**Tabela 1:** Estatística descritiva da pastagem e dos atributos físicos do solo em área sob pastagem degradada nas camadas de 0-0,10 e de 0,10-0,20m.

Atributos	Média	Mediana	Mín.	Máx.	DP	CV%	C <sub>s</sub>	C <sub>k</sub>	D
Past.t ha <sup>-1</sup>	3,82	3,82	0	9,93	2,39	24,06	0,69	-0,30	0,13*
Camada de 0-0,10m									
Ds (g cm <sup>3</sup> )	1,57	1,57	1,27	1,87	0,09	5,58	-0,11	1,81	0,13 <sup>ns</sup>
Dp(m cm <sup>3</sup> )	2,63	2,62	2,42	3,03	0,125	4,75	-0,50	-0,09	0,13 <sup>ns</sup>
PT (%)	40,46	40,23	30,9	52,17	4,28	10,59	0,13	0,08	0,13 <sup>ns</sup>
RP MPa	3,75	3,25	0,62	11,59	2,18	58,22	0,23	0,53	0,86*
UG g g <sup>-1</sup>	3,77	3,46	1,37	7,87	1,48	39,41	0,57	-0,13	0,14 <sup>ns</sup>
AT g Kg <sup>-1</sup>	701,7	704,5	552	805	52,33	7,40	-0,5	0,20	0,17*
Arg. g Kg <sup>-1</sup>	96,79	100	50	200	35,44	36,61	0,32	-0,22	0,17*
Silt. g Kg <sup>-1</sup>	201,4	202,5	97	331	52,56	26,09	-0,01	-0,37	0,13 <sup>ns</sup>
Camada de 0,10-0,20m									
Ds (g cm <sup>3</sup> )	1,59	1,59	1,34	1,79	0,09	5,97	-0,30	0,23	0,13 <sup>ns</sup>
Dp(m cm <sup>3</sup> )	2,65	2,66	2,38	2,86	0,14	5,38	0,01	-1,32	0,13 <sup>ns</sup>
PT (%)	39,78	40,13	27,97	50,5	5,06	12,73	-0,41	-0,18	0,13 <sup>ns</sup>
RP MPa	8,05	7,31	1,35	20,8	4,12	51,15	0,16	-0,56	0,90*
U G g <sup>-1</sup>	3,74	3,72	1,22	7,46	1,69	42,88	0,46	-0,34	0,14 <sup>ns</sup>
AT g Kg <sup>-1</sup>	680,7	682	488	797	57,98	8,52	-0,74	1,39	0,13 <sup>ns</sup>
Arg. g Kg <sup>-1</sup>	112,1	100	50	200	25,95	24,02	0,64	0,78	0,17*
Silt. g Kg <sup>-1</sup>	207,0	200	102	412	58,92	28,45	0,74	1,14	0,13 <sup>ns</sup>

Ds = densidade do solo; Dp= densidade de partículas PT= porosidade total; RP= resistência a penetração G= umidade gravimétrica; AT=areia total; Arg=argila; Silt=Silte; Min= Mínimo; Max=Máximo DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; Cs= coeficiente de assimetria; Ck= coeficiente de curtose; D= teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; ns= não significativo; \*= Significativo; PT=porosidade total.

A densidade do solo (Ds) apresentou valores médios de 1,57 g cm<sup>-3</sup> na primeira camada estudada e de 1,59 g cm<sup>-3</sup> na camada de 0,10-0,20m, evidenciando compactação por pisoteio animal na pastagem, e o em profundidade ocorre por conta da redução do conteúdo de matéria orgânica e aumento material mineral, estes resultados corroboram com Lima et al. (2015). além da densidade do solo, a densidade de partículas (Dp) apresentou o mesmo comportamento de aumento com a profundidade com valores de 2,63 g cm<sup>-3</sup> na camada de 0-0,10 e 2,65 g cm<sup>-3</sup> na camada de 0,10-0,20cm. Os valores médios de porosidade total (PT) variaram pouco entre as camadas, 40,46 % na primeira camada estudada e 39,78 na camada de 0,10-0,20m, Guimarães et al. (2016) encontraram valores médios muito próximos a estes, estudando Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens.

Com relação a resistência do solo a penetração (RSP) observou-se valor médio alto 3,75 MPa na camada de 0-0,10m e extremamente alto 8,05 MPa na camada de 0,10-0,20m conforme a classificação de Arshad et al. (1996). A umidade gravimétrica do solo, os valores variaram de 1,37 a 7,87 (g g<sup>-1</sup>), e 1,22 a 7,46 g g<sup>-1</sup> nas camadas de 0-0,10m e 0,10-0,20m, respectivamente. Notou-se que, em ambas as camadas, os valores estavam próximos, não interferindo na análise da resistência do solo a penetração que é altamente influenciada pela umidade.

Os atributos densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total apresentaram baixo CV, enquanto resistência do solo a penetração e umidade gravimétrica apresentaram valores médios. Em relação aos dados de textura solo, a variável areia total apresentou CV abaixo de 12% nas duas camadas com CV:

7,40% na camada de 0,00-0,10m e 8,52% na camada de 0,10-0,20m. Já o silte e argila apresentaram valores médios entre 12-60% (Tabela 1).

Mesmo que os valores de CV se apresentaram baixos e/ou moderados, este não é um bom indicador da variabilidade espacial dos atributos do solo, pois podem ocorrer no campo valores extremamente altos ou baixos. Segundo Camargo et al. (2010), em se tratando de dados obtidos na natureza, o ajuste de uma distribuição teórica é apenas aproximado, não sendo necessária, portanto, a normalidade dos dados estatísticos para estes serem submetidos à geoestatística.

## Geoestatística

Foi identificada dependência espacial em todos os atributos nas duas camadas. O modelo matemático mais ajustado aos semivariogramas foi o esférico, com exceção de PT, argila na camada de 0-10m, e areia total nas duas camadas que se ajustaram ao modelo exponencial (Tabela 2).

**Tabela 2:** Modelos e parâmetros estimados da pastagem e dos semivariogramas experimentais dos atributos físicos do solo em área de pastagem degradados nas camadas 0-0,10m e 0,10-0,20 m.

Atributos	Mod.	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	a (m)	GDE (%)	R <sup>2</sup>	SQR	N	Outlei
Past. (t ha <sup>-1</sup> )	Esf.	0,14	0,67	68	61,19	96,6	1.01 <sup>08</sup>	78	3
Camada de 0-0,10m									
Ds (g cm <sup>3</sup> )	Esf.	0,001	0,007	20,70	20,18	99,1	8,09 <sup>-08</sup>	78	7
Dp(m cm <sup>3</sup> )	Esf.	0,004	0,0014	6,70	31,52	94,3	2,46 <sup>-07</sup>	78	1
PT (%)	Exp.	8,65	17,31	42,50	49,97	97,6	0,89	78	4
RP MPa	Esf.	0,01	4,75	19,00	0,21	97,6	0,28	69	6
UG g g <sup>-1</sup>	Esf.	0,03	3,76	106,80	0,80	96,7	0,63	70	6
AT g Kg <sup>-1</sup>	Esf.	297	2986	79	9,94	98,6	6,248	78	2
Arg. g Kg <sup>-1</sup>	Exp.	307	894,4	19,4	34,32	85,7	1,487	78	7
Silt. g Kg <sup>-1</sup>	Esf.	928	928	44,50	36,31	96,3	6,787	78	5
Camada de 0,10-0,20m									
Ds (g cm <sup>3</sup> )	Esf.	0,004	0,009	41,00	43,71	99,0	1,68 <sup>-07</sup>	78	3
Dp(m cm <sup>3</sup> )	Esf.	0,004	0,0176	12,40	25,03	95,6	9,93 <sup>-07</sup>	78	2
PT (%)	Esf.	4,33	22,80	20,20	18,99	96,8	4,10	78	3
RP MPa	Esf.	2,85	15,34	14,50	18,58	97,1	1,00	69	4
UG g g <sup>-1</sup>	Esf.	0,01	3,81	81,70	0,26	99,5	0,18	70	2
AT g Kg <sup>-1</sup>	Exp.	264	2330	52,70	11,33	97,8	8,057	78	2
Arg. g Kg <sup>-1</sup>	Esf.	11,11	47,23	19	23,50	93,5	2,469	78	7
Silt. g Kg <sup>-1</sup>	Esf.	11,42	38,90	52,8	29,35	99,4	27,39	78	4

Past= pastagem; Esf.= modelo esférico; Esp.= modelo exponencial; Ds = densidade do solo; Dp= densidade de partículas; PT= porosidade total; RP= resistência do solo a penetração; UG= umidade gravimétrica; Ar.G=areia grossa; AF= areia fina; AT=areia total; Arg=argila; Silt=Silte; C<sub>0</sub>= efeito pepita; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>= patamar; a= alcance; GDE= grau de dependência espacial; R<sup>2</sup>= coeficiente de determinação do modelo; SQR= soma de quadrados do resíduo; N= tamanho da amostra

O grau de dependência espacial que é a razão do efeito pepita sobre o patamar em percentagem. Atributos como densidade do solo na camada 0-0,10m, sendo resistência do solo a penetração e umidade gravimétrica e areia total indicaram grau de dependência espacial forte segundo a classificação Cambardela, et al. (1994). Por outro lado, foi observada dependência espacial nos resultados de porosidade total densidade de partículas, silte e argila na camada 0-0,10m (KAMIMURA et al., 2013).

O maior alcance foi de 106,80m para umidade gravimétrica na camada 0-0,10m e o menor 6,7 da densidade de partículas na mesma camada (tabela 2). Segundo Vieira (2000), o alcance indica a distância limite entre pontos correlacionados entre si. Pontos coletados com distância maiores que os alcances são independentes e, para sua análise, pode-se utilizar a estatística clássica. A umidade gravimétrica é um

atributo em que sua variabilidade está associada a variações de diversos fatores relacionados ao solo e ao clima, o que pode justificar o seu maior alcance entre os atributos em estudo. Enquanto a densidade de partícula depende exclusivamente da variabilidade dos principais minerais de constituição dos solos, no caso dos Latossolos da região, majoritariamente quartzo.

Foi observado uma variação espacial dos atributos físicos do solo uniforme com menor variação na camada de 0-0,10m. Isto pode ser explicado por conta do manejo inadequado da pastagem, que pode ter deteriorado os atributos físicos do solo, uma vez que o efeito compactante do pisoteio animal, na camada superficial do solo resulta em alteração da estrutura, que pode ocasionar selamento superficial e potencializar a compactação.

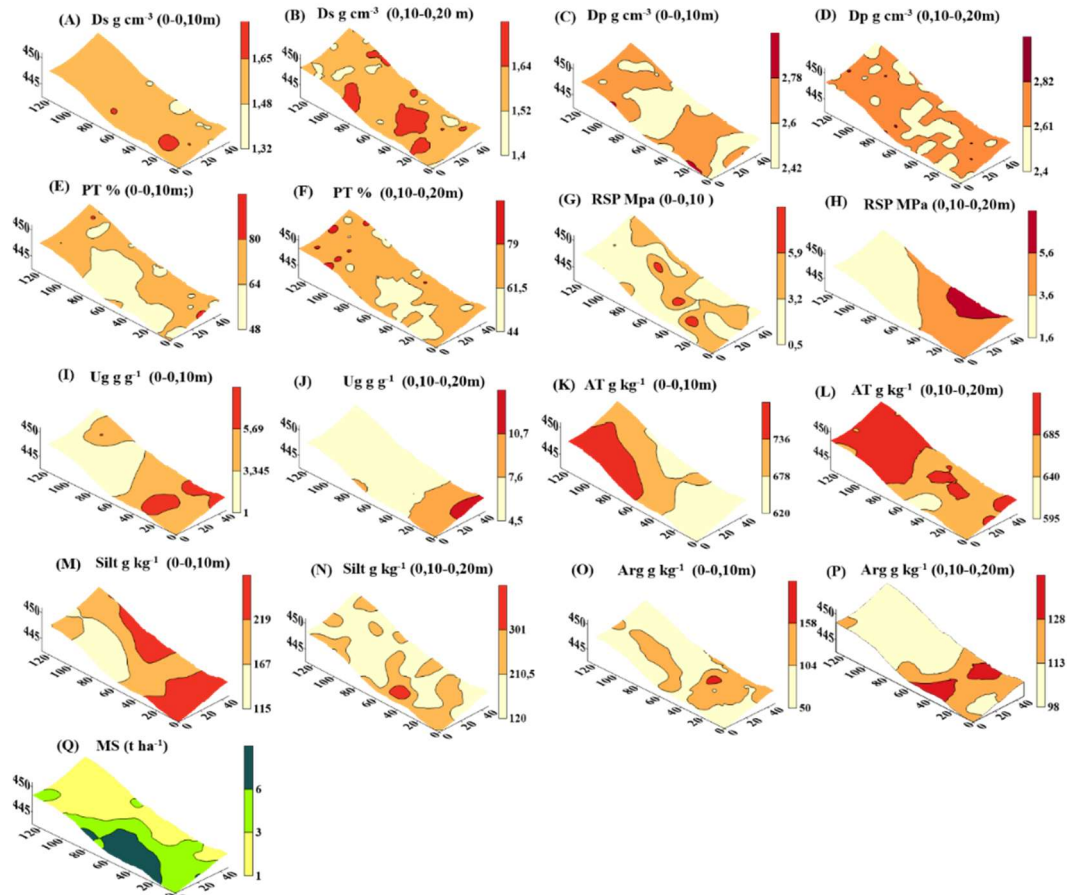
## **Krigagem**

A partir dos mapas de isolinhas foi possível observar o comportamento dos atributos físicos, bem como da produção de matéria seca da pastagem dentro da área. A  $D_s$  na camada de 0-0,10 m (Fig. 2 A) predominou com valor de  $1,48 \text{ g cm}^{-3}$  (tonalidade laranja) e em algumas do mapa, observou valores acima e abaixo deste (tonalidade vermelha e amarelo claro). Na camada de 0,10-0,20 m, verificou-se áreas maiores com  $D_s$  superior a  $1,52 \text{ g cm}^{-3}$  (tonalidade laranja) e algumas regiões significativas com densidade do solo superior a  $1,64 \text{ g cm}^{-3}$  (Fig. 2 B) resultados corroboram com os de Kamimura et al. (2013). A  $D_p$  se encontra distribuída espacialmente no solo estudado com valores em sua maioria acima de  $2,6 \text{ g cm}^{-3}$ , representados pelas colorações vermelha e laranja expressa nos mapas das duas camadas estudadas (Figuras 2 C e D). A PT mostra espacialização similar a  $D_p$  nas duas camadas estudadas, isto se deve ao fato de o volume sólido do solo está estritamente ligado a porosidade total do solo, evidenciando assim que a  $D_p$  é essencial no estudo da PT, para manejo do solo (Fig. 2 E e F).

Na figura 2 (G) e (H), observa-se que nas duas camadas a RP predominante compreendeu valores variando de 0,5 a 5,9 MPa na primeira camada e de 1,6 a 5,6 na camada de 0,10-0,20m, observa-se também que as duas camadas do solo estão altamente compactadas (tonalidade vermelha) com capacidade de restringir severamente o desenvolvimento da maioria das plantas, inclusive da pastagem. Resultados corroboram com Torres et al. (2015) que encontram resultados parecidos ao avaliar resistência do solo à penetração e densidade do solo num Latossolo. A umidade gravimétrica do solo apresentou distribuição espacial bem definida como pode ser observada na figura 2 (I) e (J), a importância de fazer análise da umidade do solo se atrela para melhor interpretação dos valores de RS, pois esta por sua vez pode ser extremamente alta em um solo seco ou mesmo baixa no mesmo solo com presença de água.

Com relação ao mapa da areia total na figura 2 (K) e (L), foi observado que o solo estudado possui grande quantidade deste atributo textural na camada de 0-0,10m indicado pela tonalidade vermelha e laranja. Na camada de 0,10-0,20 também se observa a predominância de areia total com valores variando de 640 a  $685 \text{ g Kg}^{-1}$ . Nos mapas de isolinhas do atributo silte nas duas camadas (Fig. 2 M e N), observa valores em torno de  $219 \text{ g Kg}^{-1}$  na camada 0-0,10m observado pela tonalidade vermelha, enquanto na camada 0,10-0,20m a mancha vermelha indicando maior quantidade deste atributo é insignificante, por outro lado a

tonalidade laranja indica também valores altos de silte na segunda camada, com valores em torno de 210,5 g Kg<sup>-1</sup>, resultados parecidos foram encontrados por Bottega et al. (2013) estudando variabilidade espacial de atributos do solo em áreas do cerrado brasileiro.



**Figura 2:** Distribuição espacial dos atributos físicos do solo (A-P) e mapa de pastagem (Q).

A argila apresentou distribuição espacial bem definida assim com os demais atributos estudados (Fig. 2 O e P), concordando com dados encontrados por Lima et al. (2015) estudando variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área degradada.

Assim como os atributos físicos do solo a pastagem também apresentou média e mediana próxima, e coeficiente de variação médio (Tabela 1) e apresentou variabilidade explícita no mapa de isolinhas (Fig. 2 Q), evidenciando que dependência espacial dos atributos físicos do solo influencia na produção de forragem, e por isso os atributos físicos do solo devem ser levados em consideração para o melhor manejo das áreas de produção, seja nos campos agrícolas ou de produção de forragens. A coloração verde escura mostra produção de matéria seca em torno de 6 toneladas por hectare, já nas tonalidades verde claro e amarelo claro indicam menores produções de matéria seca.

Como se observa nos mapas, o conhecimento da distribuição espacial dos atributos físicos do solo e seus valores característicos podem ser utilizados como indicadores de qualidade física do solo. Greco et al. (2012), ao estudar variabilidade espacial do solo e da biomassa epigea de pastagem identificada por meio de geostatística fez comparações de mapas dos atributos com o mapa de matéria seca, e usou para criar um indicador do potencial do solo e identificação dos diferentes níveis de degradação da área de pastagem



degradada.

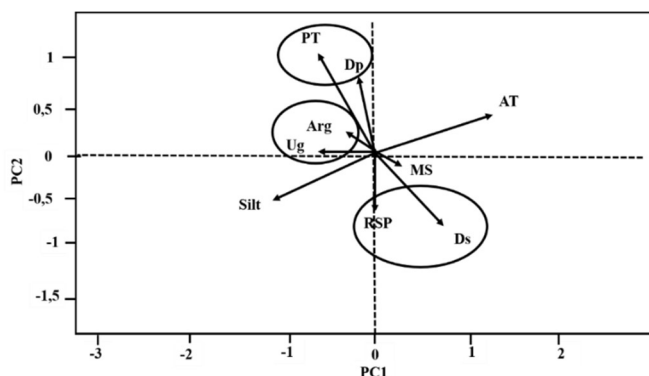
## Estatística Multivariada

A análise de componentes principais indicou similaridade entre os atributos pela correlação da direção e tamanho dos vetores, assim como relações contrárias também foram observadas (Fig. 3). Atributos físicos ligados a porosidade influenciaram diretamente no desenvolvimento das plantas, como a densidade de partículas, densidade do solo e RSP, conseqüentemente foram inversamente proporcionais à produção de massa seca.

Com relação a variância relativa das PCs explicadas pelas no método de autovalores, as duas primeiras componentes são responsáveis por 75,04% da variância total, sendo 28,41% na CP1 e 46,63% na CP2.

Por outro lado, atributos que definem a granulometria interferiram na retenção de água. A argila tem uma correlação positiva com umidade gravimétrica, à medida que o Silte e Areia indica correlação contrária com o mesmo atributo. Embora o vetor de MS de pastagem esteja na direção contrária da umidade gravimétrica do solo, isso não quer dizer que houve uma correlação negativa entre os referidos atributos, pois a apresentação da umidade gravimétrica no primeiro quadrante é em função dos vetores contrários da argila com relação a areia total.

Baseado no cumprimento dos vetores, os atributos PT, AT, Ds e Silte tem maior influência nos demais, e distintamente representados nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, respectivamente, da análise de componentes principais. Observa-se que em a porosidade total (PT) é o atributo que apresenta menor correlação com a produtividade de pastagem (MS), isso ocorreu por que a área de estudo é uma pastagem degradada que pelo histórico são mais de 10 anos sem pastejo sem rotação de animais e sem renovação do pasto. O pisoteio animal reduz a macroporosidade mas aumenta a microporosidade responsável neste caso pelo aumento da porosidade total.



**Figura 3:** Análise dos componentes principais dos atributos. Ds = densidade do solo; Dp= densidade de partículas; PT= porosidade total; RP= resistência do solo a penetração; Ug= umidade gravimétrica; AT=areia total; Arg=argila; Silt=Silte; MS= Massa seca da pastagem.

Curiosamente o Silte e Areia Total apresentam direções opostas para crescimento, ou seja, à medida que um aumenta o outro diminui, mas isso pode ser justificado por o local de estudos está na superfície geológica da formação Rio Preto do Grupo Formosa, início da bacia do rio Parnaíba, áreas ricas em material

sedimentar, ou seja, no solo o silte e a areia podem não ter uma ligação direta com o intemperismo local, e sim com processos pedogenéticos da região.

## CONCLUSÕES

Foi identificada estrutura de dependência espacial para todos os atributos físicos do solo nas duas camadas de estudo.

A variabilidade espacial dos atributos físicos do solo influenciou na produtividade de pastagem, refletindo diretamente na massa seca.

A Técnica de Krigagem demonstrou ser uma alternativa viável par interpolação de dados em locais não amostrados na área de estudo e para comparação de mapas de produtividade de pastagem com atributos do solo.

Pela Análise de Componentes Principais na análise multivariada a porosidade total é inversamente proporcional a produtividade de massa seca.

## REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G.. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, p.711-728, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B.. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J.. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141.

AWAL, R.; SAFEEQ, M.; ABBAS, F.; FARES, S.; DEB, S. K.; AHMAD, A.; FARES, A.. Soil physical properties spatial variability under long-term no-tillage corn. *Agronomy*, v.9, n.11, p.750, 2019. DOI: <http://doi.org/10.3390/agronomia9110750>

BENEVENUTE, P. A.; MORAIS, E. G.; SOUZA, A. A.; VASQUES, I. C.; CARDOSO, D. P.; SALES, F. R.; SILVA, B. M.. Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. *Ecological Indicators*, v.117, n.106647, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106647>

BITENCOURT, D. G. B.; BARROSB, W. S.; TIMMC L. C.; SHED, D.; PENNINGE, L. H.; PARFITTF, J. M. B.; REICHARDTG, K.. Multivariate and geostatistical analyses to evaluate lowland soil levelling effects on physico-chemical properties. *Soil & Tillage Research* v.156, p63-73, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.004>

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A.. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. *Revista Ciência Agrônômica*, v.44, n.1, p.1-9, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1806-66902013000100001>

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.. Spatial variability of physical attributes of an alfisol under different hillslope curvatures. *Revista Brasileira de Ciência*

*do Solo*, v.34, n.3, p.617-630, 2010.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E.. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Societ. Am. J.*, v.58, p.1501-1511, 1994.

CARNEIRO, J. S.S.; FARIA A. J. G.; FIDELIS, R. R.; SILVA NETO, S. P.; SANTOS, A. C.; SILVA, R. R.. Diagnóstico da variabilidade espacial e manejo da fertilidade do solo no cerrado. *Revista Scientia Agraria*, v.17, n.3, p.38-49, 2016.

COLOMBI, T.; TORRES, L. C.; WALTER, W.; KELLER, T.. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth - A vicious circle. *Science of the Total Environment*, v.626, p.1026-1035, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>

CORNÉLIO, V. L.; COMPAGNON, A. M.; PEREIRA FILHO, W. J.; SILVEIRA, M. G.; CINTRA, P. H. M.. Métodos de posicionamento para a determinação da variabilidade espacial de atributos do solo. *Revista Brasileira Multidisciplinar*, v.24, n.3, 87-99, 2021. DOI: <http://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2021.v24i3.943>

GOLDEN SOFTWARE INC. **Surfer for windows**: realese 7.0, contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers user's guide. 1999.

GRECO, C. R.; CRISTINA, A. G.; NOGUEIRA, S. F.; GIMENES, F. M.; OLIVEIRA, A. A.; ALMEIDA, C. G. F.; FURTADO, A. L. S.; DEMARCHI, J. J. A. A.. Variabilidade espacial do solo e da biomassa epígea de pastagem, identificada por meio de geostatística. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* v.47, n.9, p.1404-1412, 2012.

GUIMARÃES, W. D.; GRIPP JUNIOR, J.; MARQUES, E. A. G.; SANTOS, N. T.; FERNANDES, R. B. A.. Variabilidade espacial

de atributos físicos de solos ocupados por Pastagens.

**Revista Ciência Agronômica**, v.47, n.2, p.247-255, 2016.

DOI: <http://doi.org/10.5935/1806-6690.20160029>

JOHN, K.; AFU, S. M.; ISONG, I. A.; AKI, E. E.; KEBONYE, N. M.; AYITO, E. O.; PENÍŽEK, V.. Mapping soil properties with soil-environmental covariates using geostatistics and multivariate statistics. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v.18 n.11, p.3327-3342, 2021.

KAMIMURA, K. M.; SANTOS, G. R.; OLIVEIRA, M. S.; JUNIOR, M. S. D.; GUIMARÃES, P. T. G.. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo vermelho-amarelo sob lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.3, p.877-888, 2013.

LI, Z.; TAO, H.; ZHAO, D.; LI, H.; LI, Z.; TAO, H.; ZHAO, D.; LI, H.. Three-dimensional empirical Bayesian kriging for interpolation of soil PAHs considering the vertical soil lithology. **Catena**, v.212, n.106098, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106098>

LIMA, F. V.; SILVINO, G. S.; MELO, R. S.; LIRA, E. C.; RIBEIRO, T. S.. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Revista Caatinga**, v.28, n.4, p.53- 63, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n406rc>

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. DOI: <http://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140215>

RAUBER, L. P.; ANDRADE, A. P.; FRIEDERICHS, A.; MAFRA, Á. L.; BARETTA, D.; ROSA, M. G. D.; CORREA, J. C.. Soil physical indicators of management systems in traditional agricultural areas under manure application. **Scientia Agricola**, n.75, n.4, p.354-359, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0453>

RIBEIRO, L. S.; OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S.; SILVA, C. V.; SILVA, G. R. J. R.. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo coeso sob sistemas de manejo convencional e de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1699-1702, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900071>

SANCHES, G. M.; MAGALHÃES, P. S. G.; FRANCO, H. C. J..

Site-specific assessment of spatial and temporal variability of sugarcane yield related to soil attributes. **Geoderma**, v.334, p.90-98, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.051>

SAS INSTITUTE INC. **SAS/STAT®University Edition, User's Guide**. Cary: SAS Institute Inc., 2016.

SCHJØNNING, P.; MCBRIDE, R. A.; KELLER, T.; OBOUR, P. B.. Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. **Geoderma**, v.286, p.83-87, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.020>

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAUJO, F. S.; BARBOSA, R. S.. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.4, p.603-612, 2012.

STOLF, R.. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.299-235, 1991.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G.. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

TORRES, J. L. R.; ALMEIDA, C. D. D.; SILVA NETO, O. F.; ARAÚJO, A. S.; SILVA, V. R.; SILVA, V. D. M.. Avaliação da resistência à penetração e densidade do solo num latossolo sob semeadura direta há doze anos. **Global Science and Technology**, v.8, n.1, p131-140, 2015.

USOWICZ, B.; LIPIEC, J.. Assessment of the spatial distribution of cereal yields on sandy soil related to the application of soil-improving cropping systems (SICS). **Science of The Total Environment**, v.830, 154791, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154791>

VIEIRA, S. R.. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, P. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2000. p.1-54.

ZÚÑIGA, F.; IVELIC-SÁEZ, J.; LÓPEZ, I.; HUYGENS, D.; DÖRNER, J.. Temporal dynamics of the physical quality of an Andisol under a grazing system subjected to different pasture improvement strategies. **Soil Tillage Res.**, n.145, p.233-241, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.014>

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.

Todas as obras (artigos) publicadas serão tokenizadas, ou seja, terão um NFT equivalente armazenado e comercializado livremente na rede OpenSea ([https://opensea.io/HUB\\_CBPC](https://opensea.io/HUB_CBPC)), onde a CBPC irá operacionalizar a transferência dos direitos materiais das publicações para os próprios autores ou quaisquer interessados em adquiri-los e fazer o uso que lhe for de interesse.



Os direitos comerciais deste artigo podem ser adquiridos pelos autores ou quaisquer interessados através da aquisição, para posterior comercialização ou guarda, do NFT (Non-Fungible Token) equivalente através do seguinte link na OpenSea (Ethereum).

*The commercial rights of this article can be acquired by the authors or any interested parties through the acquisition, for later commercialization or storage, of the equivalent NFT (Non-Fungible Token) through the following link on OpenSea (Ethereum).*



<https://opensea.io/assets/ethereum/0x495f947276749c6e46f68ac8c248420045cb7b5e/4495187680044091584990248054507007866474086961356520679561157878070592405505/>