



FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA

HELDER NOMINATO PEREIRA

Variabilidade espacial de atributos do solo em área de plantio de soja

Publicação nº: 28/2020

GOIANÉSIA/GO

2020



FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA

HELDER NOMINATO PEREIRA

Variabilidade espacial de atributos do solo em área de plantio de soja

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Faculdade Evangélica de Goianésia, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Prof. Me. Gustavo Henrique Mendes Brito

GOIANÉSIA/GO

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Nominato Pereira, Helder
Variabilidade espacial de atributos do solo em área de plantio de soja. / Helder Nominato Pereira. – 2020, 30p.

Orientador: Prof. Me. Gustavo Henrique Mendes Brito.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Faculdade Evangélica de Goianésia, 2020.

1. Ciências Agrárias. 2. Agronomia. 3. Geoprocessamento. I. Henrique Mendes Brito, Gustavo II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEREIRA, H. N. **Variabilidade espacial de atributos do solo em área de plantio de soja**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) - Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2020.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: HELDER NOMINATO PEREIRA

GRAU: BACHAREL

ANO: 2020

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia permissão para reproduzir cópias desta Monografia de Graduação para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta Monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.



Nome: HELDER NOMINATO PEREIRA

CPF: 848.205.351-53

Endereço: RUA 23, Nº 2196, GRANVILLE, GOIANÉSIA-GOIÁS.

Email: hnominato@hotmail.com

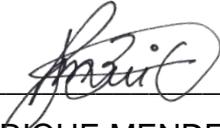
HELDER NOMINATO

Variabilidade espacial de atributos do solo em área de plantio de soja

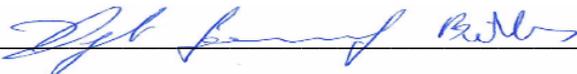
Trabalho de conclusão do curso de Agronomia da Faculdade Evangélica de Goianésia apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Agronomia.

DATA DE APROVAÇÃO: 30/ 12/ 2020

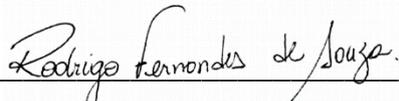
APROVADA POR:



Me. GUSTAVO HENRIQUE MENDES BRITO, MESTRE
Faculdade Evangélica de Goianésia – FACEG
ORIENTADOR



Me. DYB YOUSEFF BITTAR
Faculdade Evangélica de Goianésia – FACEG
EXAMINADOR



Me. RODRIGO FERNANDES DE SOUZA, MESTRE
Faculdade Evangélica de Goianésia – FACEG
EXAMINADOR

A todos, que me incentivaram desde sempre a estudar, são a razão da realização deste sonho, eles sonharam por mim e pela graça e misericórdia de Deus estou vencendo esta etapa, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado o dom da vida, e com isso a capacidade de enfrentar esse grande desafio e ao mesmo tempo um grande sonho, que sem ele não seria capaz de encarar e prosperar com nada.

A minha família, aos meus Pais, meus irmãos que estava comigo nos momentos mais críticos, minha esposa e filhos que sempre me apoiaram durante todo esse percurso de graduação, que nunca me deixou desistir e sempre acreditou em mim que eu era capaz de realizar minhas ambições.

Aos professores que sempre me apoiaram e teve a paciência de passar seus conhecimentos, em especial meu orientador que esteve comigo nesse trabalho de conclusão de curso desde o começo, que sempre acreditou no meu potencial mesmo quando não acreditaram em mim, ele foi quem me apoiou e fez-me acreditar que eu ia conseguir, e sempre foi paciente comigo, obrigado por tudo Prof. Gustavo Henrique.

Agradeço a todos os funcionários da instituição, pela paciência e companheirismo, aos colegas e amigos de sala que me acompanharam durante estes anos, obrigado por compartilharem aprendizados das matérias e de vida, por me ensinarem a lidar com as diferenças do próximo, a trabalhar em equipe e ser companheiro. Desenvolvi grandes amizades e quero leva-las para sempre comigo.

Agradeço à Faculdade Evangélica de Goianésia por contribuir com a concretização desse grande sonho.

Em fim a todos que mim ajudaram e apoiaram nessa árdua caminhada, que DEUS abençoe a todos e ilumine seus caminhos, sou grato a todos que direta ou indiretamente colaboraram com a minha formação, obrigado!

***“O que vivemos é novidade, o que sabemos é conhecimento,
o que devemos ter é tecnologia, respeito a natureza;
o que seremos, depende do nosso esforço pessoal”***

Autor desconhecido.

RESUMO

A agricultura de precisão (AP) implica análise da variabilidade espacial de fatores de produção e a distribuição de insumos de forma localizada. Várias são as causas que condicionam a variabilidade espacial dos solos, sendo a diferença altimétrica um dos fatores mais importantes. O atual trabalho teve por objetivo avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e a confecção de mapas de necessidade de aplicação de calcário e gesso, em uma área com diferentes formas de relevo. Uma parcela de 100 ha foi delimitada. Foram retiradas na área amostra de solos em 40 pontos, com 400 pontos de subamostras, nas profundidades de solo de 0,00-0,20 m. Os resultados de análise química foram submetidos às análises da estatística descritiva, geoestatística e interpolação por krigagem. A adoção da AP possibilitou uma economia considerável. A partir da análise de solo, foi realizada análise geoestatística com auxílio do programa computacional GS+, e avaliação da dependência espacial entre amostras utilizando os modelos esférico, exponencial, gaussiano, linear e linear com patamar. Para simular as grades amostrais de menor intensidade, e assim avaliar os efeitos de coletas em menor número de amostras, foi realizada a exclusão de pontos da grade amostral inicial e composição das demais malhas regulares. Em todas as malhas amostrais foram realizadas análises de estatística descritiva, geoestatística e interpolação por krigagem dos atributos de capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V).

Palavras-chave: Agricultura de Precisão, Troca Catiônica (CTC), Saturação por Bases.

ABSTRACT

Precision agriculture (AP) involves analyzing the spatial variability of production factors and the distribution of inputs in a localized manner. There are several causes that condition the spatial variability of soils, with altimetric difference being one of the most important factors. The current work aimed to evaluate the spatial variability of the chemical attributes of the soil and the preparation of maps of the need to apply limestone and plaster, in an area with different forms of relief. A 100 ha plot has been delimited. Soil samples were taken from the soil at 40 points, with 400 points of sub-samples, at soil depths of 0.00-0.20 m. The results of chemical analysis were submitted to analyzes of descriptive statistics, geostatistics and interpolation by kriging. The adoption of PA enabled considerable savings. From the soil analysis, geostatistical analysis was performed with the aid of the computer program GS +, and evaluation of the spatial dependence between samples using the spherical, exponential, Gaussian, linear and linear models with plateau. In order to simulate the sampling grids of lesser intensity, and thus to evaluate the effects of collections in a smaller number of samples, the exclusion of points from the initial sampling grid and the composition of the other regular meshes will be made. Descriptive, geostatistical and kriging interpolation analyzes of the attributes of cation exchange capacity (CTC) and base saturation (V) will be performed in all sample meshes.

Keywords: Precision Agriculture, Cation Exchange (CTC), Base Saturation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Localização geográfica da área de soja na Fazenda Bocaína do Passa Três no município de Santa Rita do Novo Destino – GO.....	12
FIGURA 2. Exemplo de grade amostral de pontos e raio de subamostras.....	13
FIGURA 3. Modelos de grades amostrais que serão utilizadas na área experimental. (A) Grade de um ponto a cada 2,5 hectare (100x250 m).....	13
FIGURA 4. Modelos de grades amostrais que serão utilizadas na área experimental (A) Grade de um ponto a cada 2,5 hectare (100x250 m).....	20
FIGURA 5. Mapas da distribuição espacial da fertilidade do solo no cerrado goiano, Santa Rita do Novo Destino, Goiás (2019). Ca+Mg: Cálcio e Magnésio; pH _{CaCl2} : pH em cloreto de cálcio; C: carbono; V%: saturação por bases.....	21
FIGURA 6. Mapas da distribuição espacial da fertilidade do solo no cerrado goiano, Santa Rita do Novo Destino, Goiás (2019). Argila: porcentagem de argila; Gesso: necessidade de gessagem.....	22

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Estatística descritiva de atributos do solo.....	17
TABELA 2. - Parâmetros da semivariância e Grau de Dependência Espacial (GDE) dos atributos do solo e gesso.....	18

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 MATERIAL E METÓDOS	14
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	14
2.2 PLANEJAMENTO DA GRADE AMOSTRAL	14
2.3 ANÁLISES DE DADOS	16
2.4 RECOMENDAÇÃO DE CALCÁRIO	17
2.5 RECOMENDAÇÃO DE GESSO.....	17
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4 CONCLUSÕES	27
REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão (AP) visa criar mecanismos para otimizar o aproveitamento dos recursos naturais, diminuir os custos de produção e melhorar os rendimentos das lavouras a partir da avaliação da variabilidade espacial da fertilidade do solo, delimitação de zonas de manejo, bem como a distribuição de insumos em taxa variável (GUIMARÃES et al., 2016; MONTARINI et al., 2016). Ao se determinar a variabilidade dos atributos do solo pode-se diminuir a heterogeneidade horizontal (em superfície), vertical (em profundidade) e criar condições de cultivos em diferentes locais com melhor rentabilidade aos produtores (SANTI et al., 2012).

Como a dinâmica da distribuição dos atributos físicos e químicos dos solos são variáveis, ao se conhecer o comportamento da distribuição espacial destes atributos e dos fatores que os influenciam, pode-se realizar um manejo eficaz do solo e planta (WANI et al., 2013; ALMEIDA; GUIMARÃES, 2017). Neste sentido, a agricultura de precisão busca quantificar e modelar a variabilidade espacial e temporal destes atributos, bem como determinar o manejo específico das áreas agricultáveis a partir de amostragens georreferenciadas e análises geoestatísticas (GUIMARÃES et al., 2016). A geoestatística utiliza o conceito da teoria das variáveis regionalizadas, portanto, leva-se em consideração a localização geográfica das amostras e a dependência espacial entre elas (GREGO et al., 2014). Assim, com a análise geoestatística é possível organizar amostras de solo georreferenciadas, obter modelos matemáticos que representam a dependência espacial entre as variáveis de interesse e estimar valores em pontos não amostrados, visando auxiliar na tomada de decisões e aplicações dos insumos em dosagens prescritas e de forma localizada (MOLIN, 2010; RICHART et al., 2016).

Portanto, a geoestatística é a melhor maneira para se conhecer, determinar e modelar a variabilidade e dependência espacial entre os atributos físico-químicos dos solos e as suas respectivas localizações geográficas, para tal, são feitos ajustes de semivariogramas e a respectiva interpolação de valores não amostrados por krigagem (BARBIERI et al., 2008; ZONTA et al., 2014). Como os semivariogramas indicam o grau de dependência espacial em função da distância entre as amostras georreferenciadas, ajustando esta dependência a modelos matemáticos teóricos, a

interpolação, sem tendência e com variância mínima, dada pela krigagem, depende das informações do semivariogramas (LANDIM, 2006; MIRANDA et al., 2015).

O método da krigagem ou geoestatístico usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariogramas, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima, sendo assim um estimador ótimo (CARVALHO; ASSAD, 2005). Quando se trabalha considerando a dependência espacial, podem-se reduzir os erros aleatórios pelo controle de uma parcela deste erro associada à dependência espacial (MELLO et al., 2003a).

Ou seja, embora a krigagem forneça a estimativa dos atributos de um determinado local, este interpolador só pode ser utilizado se houver dependência espacial para as variáveis em estudo por meio do ajuste de semivariogramas (GREGO et al., 2014). Portanto, a grade de amostragem é essencial na identificação da variabilidade e dependência espacial dos atributos do solo, por consequência, malhas de observações bem planejadas constroem variogramas que melhor identificam e avaliam esta dependência (RAGAGNIN *et al.*, 2010; BERNARDI *et al.*, 2015).

No entanto, o tamanho da grade amostral é uma das maiores dificuldades para adoção da AP a partir das análises geoestatísticas, pois o seu correto planejamento deve atender requisitos técnicos, e econômicos para reconhecer e compreender a variabilidade dos diferentes atributos do solo (MOULIN, 2010). Assim, quando a distância entre amostras for superior àquelas em que há correlação espacial, acima de 5 ha, os resultados da interpolação não serão confiáveis, por outro lado, amostragens de solos muito densas podem inviabilizar economicamente as análises das características físicas e químicas do solo (RAGAGNIN *et al.*, 2010). Assim, o tamanho da grade amostral está relacionado com a acurácia e o custo, fazendo com que a grande parte dos produtores que executam amostragens georreferenciadas no Brasil, optem por utilizar grades com densidade de aproximadamente uma amostra coletada a cada à cinco (05) hectares (ha) (BERNARDI *et al.*, 2015).

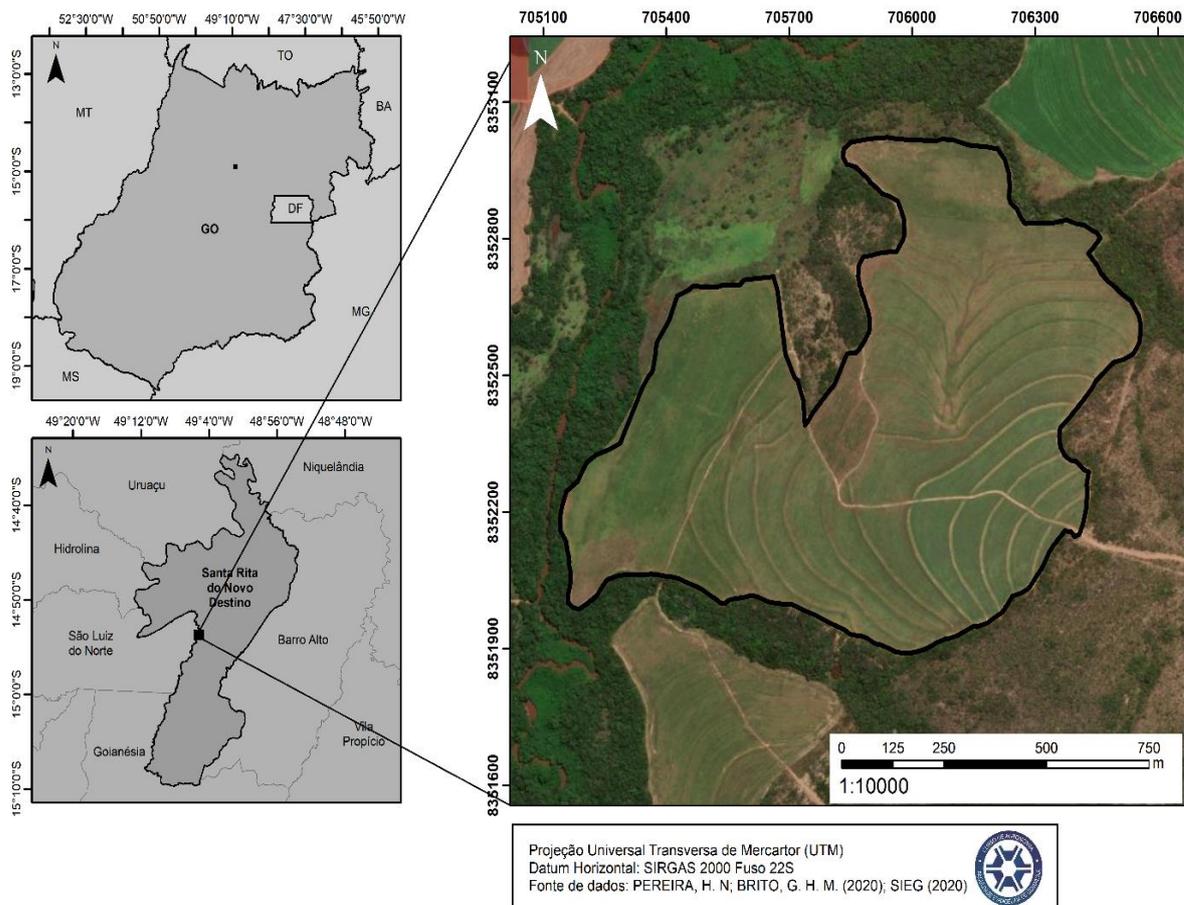
Com base nesse contexto, objetivou-se caracterizar e diagnosticar a variabilidade espacial dos atributos químicos em área de cultivo comercial de soja por meio das ferramentas geoestatísticas e realizar o manejo da fertilidade do solo por meio da agricultura de precisão.

2 MATERIAL E METÓDOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em uma área de cultivo comercial de soja no município de Santa Rita do Novo Destino, Goiás (Figura 1). A fazenda está localizada entre as coordenadas geográficas de 15°18'29" S, 48°53'41" W, apresenta altitude média de 640 m, com clima da região classificado como tropical úmido, invernos secos, verões chuvosos e temperatura variando em torno dos 20° C a 30°C.

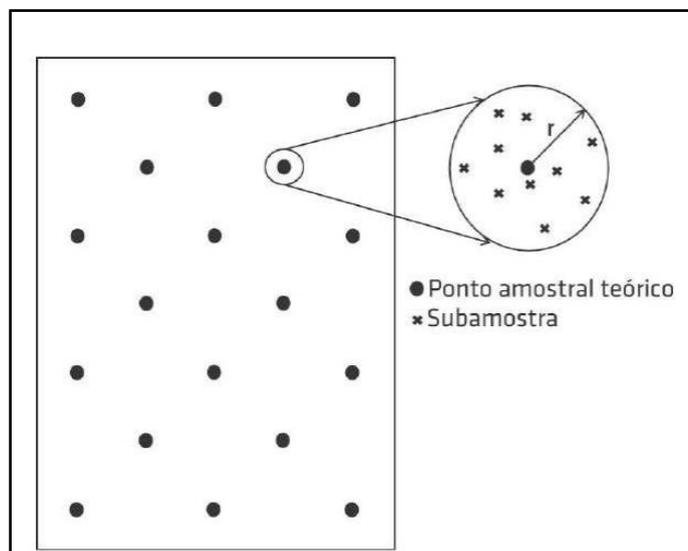
Figura 1 - Localização geográfica da área de soja na Fazenda Bocaína do Passa Três no município de Santa Rita do Novo Destino – GO.



2.2 PLANEJAMENTO DA GRADE AMOSTRAL

Foi realizada amostragens georreferenciadas do solo a partir da delimitação de uma grade regular 100x250m, ou seja, um ponto a cada 2,5 ha com profundidade de 0,0 - 20cm. Cada ponto de coleta foi georreferenciado com auxílio de um aparelho de Posicionamento global (GPS), configurado ao Datum Horizontal WGS84. Para compor a amostra de um ponto, foi realizada dez (10) subamostras no raio de dez (10) metros em torno de cada ponto amostral (Figura 2).

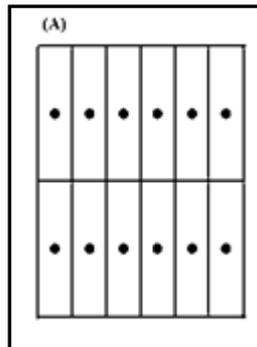
Figura 2 - Exemplo de grade amostral de pontos e raio de subamostras.



Fonte: Projeto Aquarius 2006.

Cada ponto amostral da coleta de solo foi catalogado com o respectivo par de coordenadas geográficas. Também foi realizado no mesmo local a amostragem convencional, ou seja, uma única amostra composta, formada por várias subamostras em caminhamento zigue-zague no talhão. Todas as análises químicas foram realizadas em laboratório especializado, a fim de avaliar grades amostrais, visando a redução dos custos com as respectivas amostragens. (Figura 3).

Figura 3 - Modelos de grades amostrais que serão utilizadas na área experimental. (A) Grade de um ponto a cada 2,5 hectare (100x250 m).



Fonte: Projeto Aquarius 2006.

2.3 ANÁLISES DE DADOS

Foi realizada estatística descritiva dos resultados laboratoriais para determinar a distribuição de frequência, coeficiente de variação, valores de assimetria e curtose para se conhecer o comportamento geral dos dados, identificar possíveis valores atípicos. Conforme proposto por Bernardi et al. (2015), todos os dados coletados também passaram por análise geoestatística. Para tal, foi utilizado o software GS+, para o cálculo dos semivariogramas empíricos na direção x e y, tendo como objetivo avaliar a dependência espacial das variáveis e as semivariâncias, calculadas pela equação 1 (GREGO; OLIVEIRA, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2015).

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

Em que:

$\hat{\gamma}(h)$ = semivariâncias estimada

$N(h)$ = número de pares do atributo

$Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ = valores dos atributos medidos na posição x_i e $x_i + h$, separados por um vetor h (distância entre amostras).

Os semivariogramas foram ajustados a um modelo teórico esférico, exponencial, gaussiano, linear ou linear com patamar e calculado os respectivos coeficientes do modelo teórico: efeito pepita (C_0), variância estrutural (C_1) e alcance da dependência espacial (A_0), conforme Grego e Oliveira (2014). Após verificar a dependência espacial, foi aplicada a interpolação por krigagem ordinária (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Se algum atributo não apresentar dependência espacial, ou seja, apresentaram efeito pepita puro, os mesmos serão interpolados pelo método do inverso do quadrado das distâncias, que, conforme estudo realizado por Krajewski e Gibbs (2001), é o método de interpolação por estatística clássica mais assertivo.

2.4 RECOMENDAÇÃO DE CALCÁRIO

A partir da amostragem convencional realizada na área com os resultados da análise considerando a variabilidade espacial dos atributos obtidos pela interpolação por krigagem não houve necessidade de recomendação de calagem. O cálculo da necessidade de calcário foi realizado conforme a metodologia proposta por RAIJ (2001) com as adequações sugeridas pela Embrapa (2013), para a cultura da soja. O respectivo cálculo leva em consideração a saturação por bases atual do solo e a CTC. O nível de saturação por bases ideal para a cultura da soja, para plantio sequeiro tem que ser maior ou igual a 60%. Porém não teve a necessidade de aplicação de calcário pois a saturação por bases de todos os pontos analisados estava acima do valor referido.

2.5 RECOMENDAÇÃO DE GESSO

A recomendação de gessagem foi realizada a partir da amostragem convencional e considerando a variabilidade espacial dos atributos obtidos pela interpolação por krigagem. O cálculo da necessidade de gesso foi realizado conforme a metodologia proposta por Raij (2001) com as adequações sugeridas pela Embrapa (2013), para a cultura da soja. O respectivo cálculo leva em consideração a porcentagem da argila. Todos os cálculos de recomendações e elaboração dos mapas em taxa variável foram realizados no GS⁺.e ArcGiz.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros estatísticos da análise descritiva dos atributos do solo, fósforo (P), potássio (K), acidez potencial (H+Al), capacidade de troca de cátions (CTC), relação cálcio e magnésio (Ca+Mg), pH em cloreto de cálcio (pH_{CaCl2}), carbono (C), saturação por bases (V%), argila e recomendações de gesso apresentados na Tabela 1 (RIBEIRO et al., 1999). Foram analisados os parâmetros estatísticos: média, desvio padrão, coeficiente de variação, valor mínimo, valor máximo, assimetria e curtose para verificar a existência de uma tendência central e dispersão de dados. O coeficiente de variação (CV) é considerado o primeiro indicador da heterogeneidade dos dados. Dessa forma, pode-se afirmar que o pH do solo é a propriedade do solo com menor variabilidade, com um coeficiente de variação abaixo de 10% na área analisadas. O Ca+Mg, H+Al, Argila, CTC e V% representaram propriedades do solo com variabilidade média (CV 10 a 30%), e os demais atributos com maior variabilidade, considerado muito altos (> 30%). As tendências na variação dos atributos do solo obtidas neste estudo são consistentes com as observadas por Trotter et al. (2014). Em um conjunto de dados que apresente distribuição normal, os valores para os coeficientes de assimetria e curtose estarão entre zero e três (CARVALHO et al., 2000). Para a maioria das variáveis estudadas houve distribuição normal, conforme indicado pelos coeficientes de assimetria e curtose da Tabela 1.

As variabilidades dos atributos do solo são provenientes de enigmáticas ações dos procedimentos de sua formação e de aplicações práticas de manejo do solo e da rotação de cultura, ocasionadas pelas correções sucessivas e irregulares com efeito principalmente nas camadas superficiais do solo (BOTTEGA *et al.*, 2013).

Mesmo que na área tenha sido realizado um manejo, aparece uma variabilidade natural dos atributos do solo continua, visto que, a correção com calcário e gesso é realizada a taxa fixa, considerando média de aplicação na área total.

O atributo V% mostrou um coeficiente de assimetria (Ca) negativa (-1,045) (Tabela 1). Os outros atributos químicos do solo mostraram variações assimétrica positiva. O coeficiente de assimetria (Ca) é usado para demonstrar como e quanto a distribuição de frequências se distancia da simetria. Se o valor identificado para esse parâmetro for zero, a distribuição é simétrica; se positivo, a distribuição é assimétrica à direita; e se negativo, é assimétrica à esquerda (ZANÃO JUNIOR et al., 2010). A

maioria dos atributos mostraram parâmetros de assimetria positivos, sendo o maior valor observado para o Al (3.464). Os coeficientes de curtose (Cc) também foram usados para avaliar se os dados seguem variação normal, que deve ser preferencialmente nulo, porém podem ser aceitos valores entre +2 e -2 (NEGREIROS NETO et al. (2014). Observa-se na Tabela 1 que os valores de coeficientes de curtose (Cc) dos parâmetros avaliados mostrarão dentro dos limites classificados como aceitáveis ($-2 < Cc < +2$), exceto os atributos Al (17.671) e V% (3.086) que ficaram fora dos mesmos.

Tabela 1 - Estatística descritiva de atributos do solo pH_{CaCl2}, acidez potencial (H+Al), concentração de argila, capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V), e recomendações gesso em uma área de 100 ha no município de Santa Rita do Novo Destino (Soja, safra 2019/20). Cv: coeficiente de variação; Ca: coeficiente de assimetria; Cc: coeficiente de curtose.

Atributo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	CV (%)	Coeficiente	
							Assimetria	Curtose
pH em CaCl ₂	5.43	5.40	4.80	6.10	0.33	6.11	0.191	-0.352
Ca+ Mg	2.35	2.20	1.28	4.52	0.68	28.77	1.025	0.835
Al	0.10	0.09	0.04	0.37	0.05	49.22	3.464	17.671
H+Al	3.37	3.20	2.30	5.80	0.77	22.78	1.131	1.232
K	63.92	54.00	22.00	163.00	30.23	47.29	1.150	0.880
P (meh)	1.30	1.30	0.20	2.90	0.79	60.40	0.222	-1.098
Argila	366.41	370.00	200.00	500.00	50.97	13.91	0.080	1.543
Cabono Org.	16.52	15.89	7.28	26.16	5.15	31.19	0.176	-0.949
CTC	5.89	5.59	3.94	8.44	1.00	16.92	0.586	-0.400
V%	41.45	40.70	2.60	64.30	10.98	26.49	-1.045	3.086
Gesso	1832.03	1850.00	1000.00	2500.00	254.85	13.91	0.080	1.543

Fonte: o autor.

Os resultados da análise química de solo indicaram o estoque de nutrientes no solo e os limitantes químicos na etapa anterior ao plantio, facilitando a recomendação de correção, bem como acompanhar e avaliar periodicamente o balanço dos nutrientes no solo (CANTARELLA et al, 2002; BERNARDI et al., 2012).

Os ajustes de fatores dos semivariogramas foram definidos pela ferramenta geoestatística GS+, para analisar a dependência espacial dos atributos químicos e os alcances da autocorrelação espacial, foi comparada para os diferentes parâmetros avaliados. Na análise dos semivariogramas o alcance é um parâmetro significativo, que aponta a distância máxima em que o atributo está correlacionado espacialmente,

determinando a extensão da correlação espacial entre as amostras (DALCHIAVON *et al.*, 2012).

Os diferentes valores de alcance foram identificados para os atributos químicos avaliados. Na Tabela 2 pode-se analisar que os valores do alcance encontrados tiveram uma variação de 208 m (H+Al) a 710 m ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$), o que pode ser um indicativo de áreas homogêneas e da variabilidade dos atributos analisados, os quais demonstraram raios de áreas consideradas homogêneas para cada variável estudada (LIMA *et al.*, 2014; RESENDE *et al.*, 2014). Carneiro *et al.* (2016) estudaram a variabilidade espacial da fertilidade do solo no cerrado do Piauí e afirmam que os valores de alcance têm intervenções pelas práticas agronômicas realizadas, principalmente pela distribuição de corretivos, uma vez que o objetivo é realizar a homogeneização da área de cultivo. Quanto mais homogênea é a área de cultivo, maior será o espaço de correlação espacial dos atributos avaliados, ou seja, maior será o alcance (DALCHIAVON *et al.*, 2012). A adoção da AP atuando de forma pontual cada deficiência dos parâmetros, tende a padronizar a fertilidade do solo, aumentando o alcance geoestatístico e diminuindo a variabilidade espacial (MOULIN, 2010).

O valor do alcance geoestatístico pode influenciar a qualidade das estimativas, uma vez que ele determina o número de valores usados na interpolação, delimitando a extensão da correlação espacial entre as amostras (MENDES; FONTES; OLIVEIRA, 2008). Assim, estimativas feitas com interpolação por krigagem utilizando valores de alcances maiores tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representam melhor a realidade (CORÁ *et al.*, 2004).

Os modelos esférico e gaussiano foram os que melhor se adaptaram aos semivariogramas experimentais dos atributos químicos, com exceção do P, que teve melhor ajuste ao modelo exponencial.

Tabela 2 - Parâmetros da semivariância e Grau de Dependência Espacial (GDE) dos atributos do solo e gesso. H+Al: acidez potencial; CTC: capacidade de troca catiônica total; V%: saturação por bases; GDE: Grau de dependência espacial – $(C_0/(C_0+C_1))*100$; A0: Alcance; R²: coeficiente de determinação; Modelos experimentais: Esférico; Gaussiano; Exponencial; Linear. C₀: Efeito pepita; C₀ + C₁: Componente Estrutural.

Atributo Químico	Semivariância			Alcance A ₀	Modelo	GDE (%)	R ²
	C ₀	C ₁	C ₀ + C ₁				
pH CaCl ₂	0.030	0.031	0.060	710	Gau	50.66	0.976
Ca+ Mg	0.465	0.549	1.014	441	Esf	54.14	0.827
H+Al	0.000	0.045	0.046	208	Gau	99.78	0.680
K	591.338	3105.388	3696.726	415	Esf	84.00	0.873
P (meh)	0.100	41.780	41.880	504	Exp	99.76	0.916
Argila	92.414	4566.774	4659.188	241	Gau	98.02	0.998
Cabono Org.	0.010	3.477	3.487	223	Gau	99.71	0.772
CTC	0.249	0.981	1.230	400	Esf	79.76	0.986
V%	5.815	22.687	28.502	408	Gau	79.60	0.654
Gesso	6802.670	112077.205	118879.875	292	Gau	94.28	0.681

Fonte: o autor. Em que: Gau = Gaussiano, Esf = Esférico, Exp = Exponencial.

Segundo CAMBARDELLA et al. (1994) a dependência espacial indica que a distribuição dos atributos no espaço, não é aleatória e as relações entre o efeito pepita (C₀) e o patamar (C₀+C₁) demonstram predominância de grau de dependência espacial (GDE) e tem uma variação forte, moderada e fraca variando de 0 a 100% para a maioria dos atributos químicos, sendo que, menor que 25% é forte, entre 25 a 75% é moderada e acima de 75% é fraca. Na tabela 2 os atributos estão entre moderado e fraco

A principal diferença entre o modelo esférico e o exponencial é que o esférico o atinge no valor do alcance, enquanto que o modelo exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente. Os parâmetros (C₀) e (C₀+C₁) para o modelo exponencial são definidos da mesma maneira que para o esférico (DRUCK et al., 2004). O atributo que mostrou melhor ajuste ao semivariograma foi a argila com coeficiente de determinação (R²) de 0,998.

Os modelos ajustados pelos semivariogramas nas análises dos atributos químicos do solo mostraram dependência espacial (Tabela 2), em outras palavras, a distribuição desses atributos no espaço não é aleatória. As relações entre o efeito

pepita (C0) e o patamar (C0+C1) demonstram predominância de grau de dependência espacial (GDE).

O ajuste dos semivariogramas possibilitou a elaboração dos mapas (Figura 4, Figura 5 e Figura 6) a partir da interpolação de valores não amostrados pela krigagem. Estes mapas possibilitam avaliar a variabilidade da fertilidade do solo existente na área em estudo, além de visualizar possíveis zonas de manejo e subsidiar aplicações de insumos em taxas variáveis (HURTADO et al., 2009). De posse dos resultados observados nos mapas da distribuição espacial e diagnósticos da fertilidade do solo (Figuras 4 e Figura 5) não houve necessidade de recomendação de calagem e de posse da análise com resultado da concentração da argila pode realizar a recomendação a taxa variada de gesso (Figura 6) (Raij (2001).

O mapeamento da área com uso de ferramentas geoestatísticas, é o princípio para aumentar a produtividade das culturas e melhorar a eficiência do manejo do solo, além de promover uma economia na quantidade de insumos aplicados. A recomendação de doses de gesso variou de regiões com menos de 1300 kg/ha (15% da área total), para outra área entre 1300 a 1400 kg/ha (30% da área total), para outra área entre 1400 a 1500 kg/ha (20% da área total) e para outra área acima 1500 kg/ha (35% da área total) (Figura 6). Estas doses foram muito menores que as recomendadas na safra anterior, para a mesma área, que foram de 2500 kg/ha na taxa fixa para toda a área.

Figura 4: Mapas da distribuição espacial da fertilidade do solo no cerrado goiano, Santa Rita do Novo Destino, Goiás (2019). P: fósforo; K: potássio; H+Al: acidez potencial; CTC: capacidade de troca de cátions.

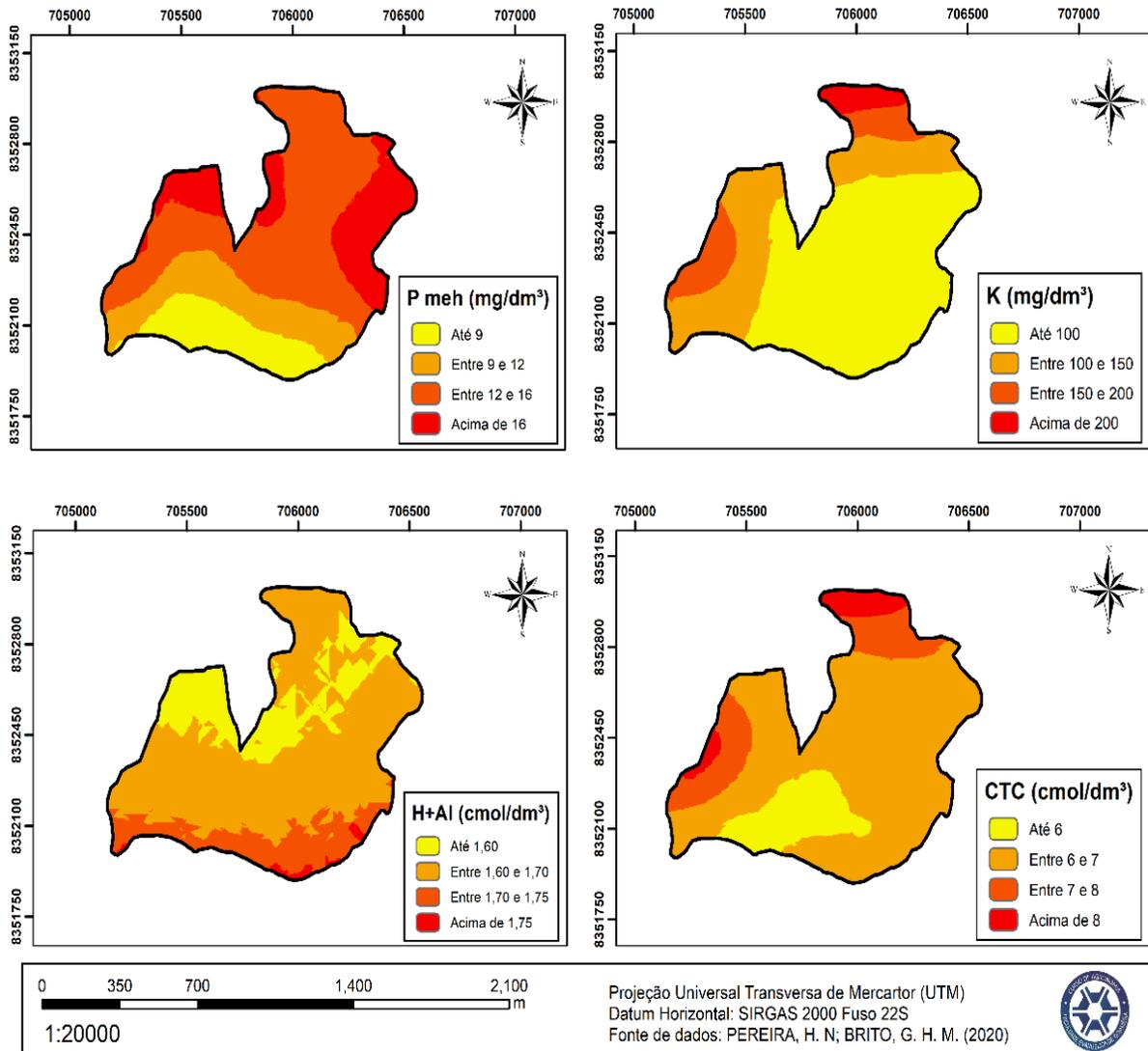


Figura 5: Mapas da distribuição espacial da fertilidade do solo no cerrado goiano, Santa Rita do Novo Destino, Goiás (2019). Ca+Mg: Cálcio e Magnésio; $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$: pH em cloreto de cálcio; C: carbono; V%: saturação por bases.

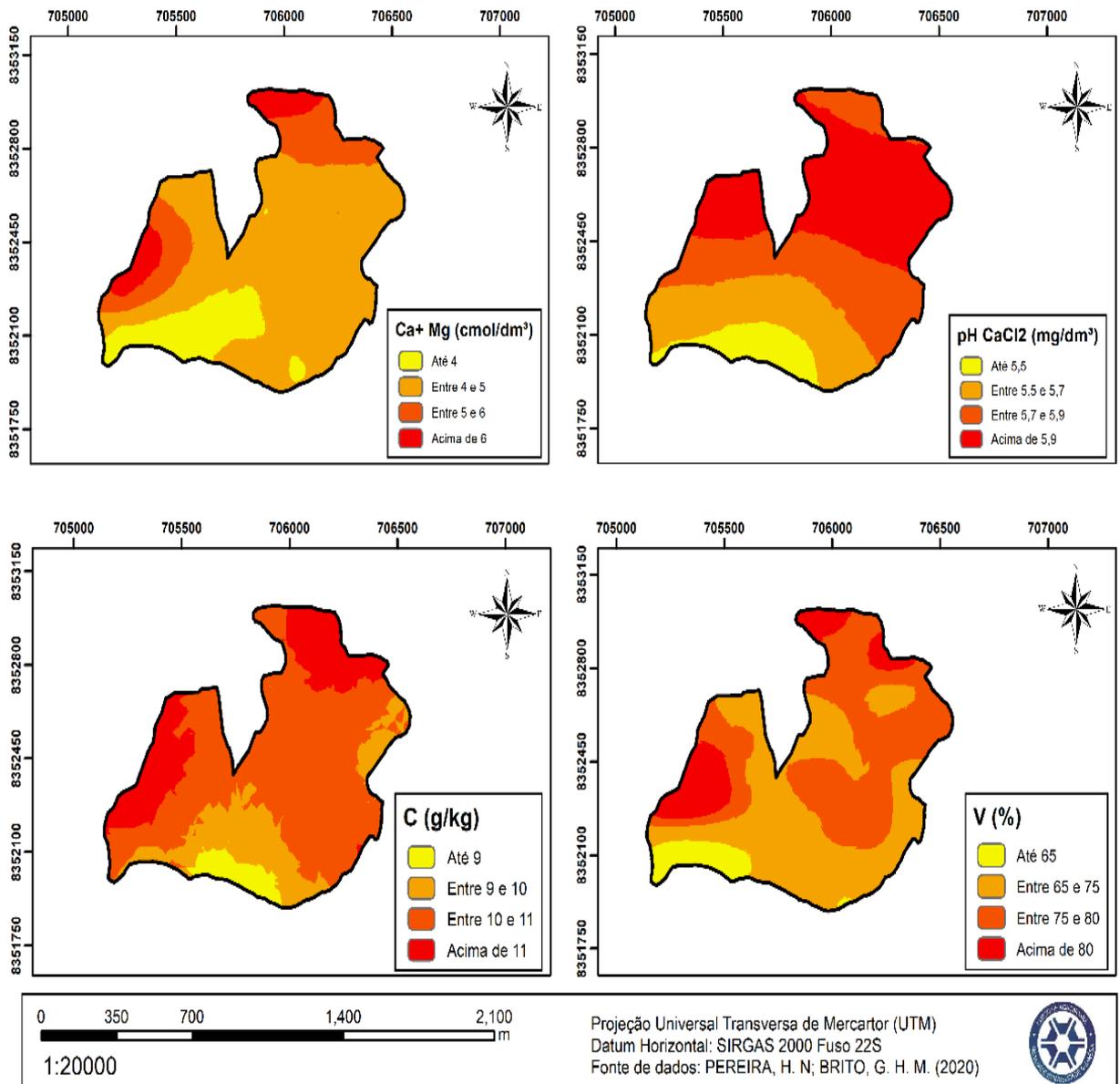
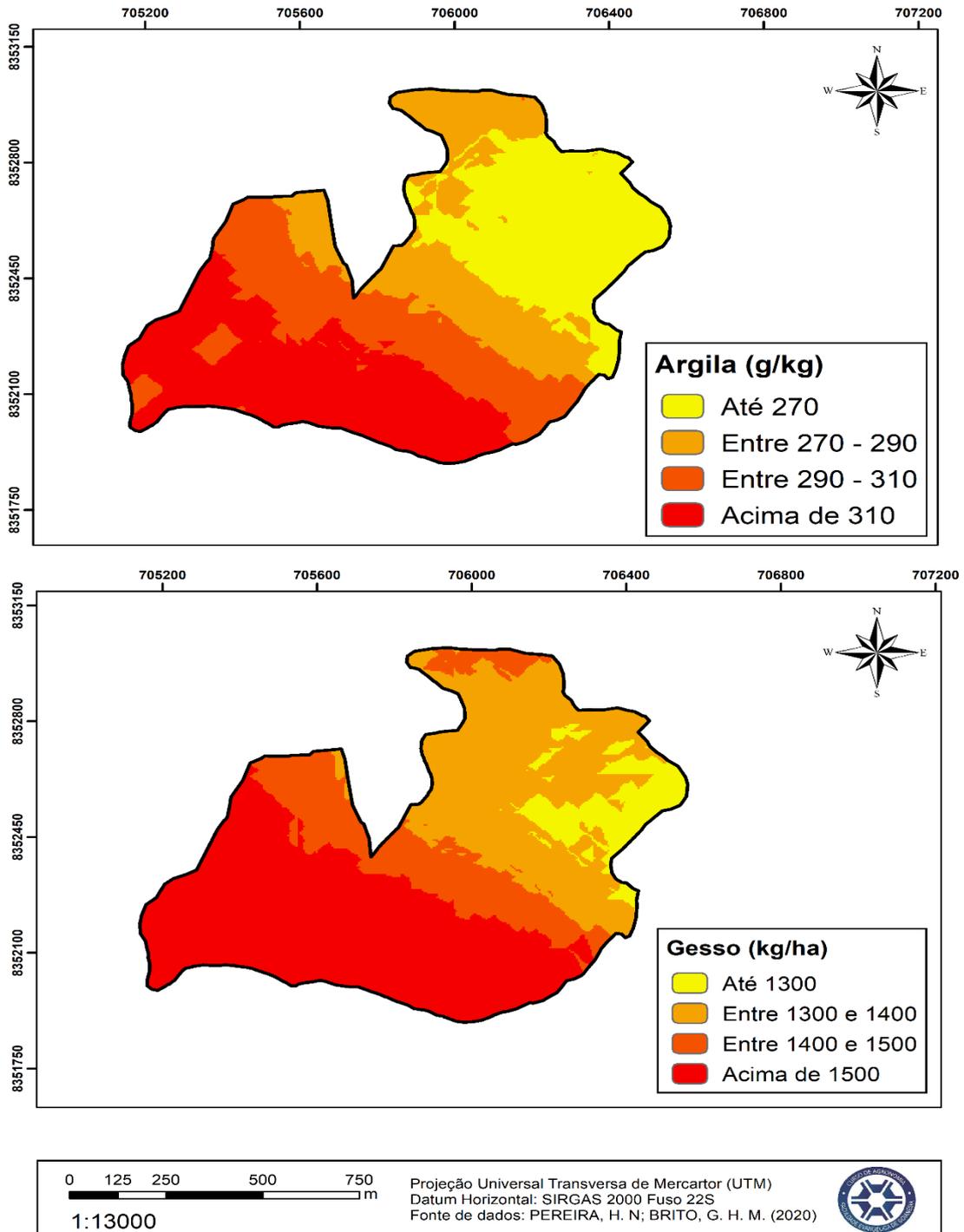


Figura 6: Mapas da distribuição espacial da fertilidade do solo no cerrado goiano, Santa Rita do Novo Destino, Goiás (2019). Argila: porcentagem de argila; Gesso: necessidade de gessagem.



O mapa de distribuição de gesso obtido por meio da interpolação dos dados, pelo método da krigagem ordinária, é essencial na análise da fertilidade do solo, o que possibilita a visualização pontos específicos de manejo, as quais são parâmetros importantes para o aumento da precisão na agricultura, e possibilita a distribuição do insumo com taxas variadas, tendo em vista à homogeneização da fertilidade do solo, minimizando as chamadas manchas de fertilidade do solo.

O mapa de recomendação de gesso (Figura 6) mostra que quando realizado a aplicação de forma variável em conformidade com as necessidades específicas, ocorrem zonas com maior e menor exigência desses insumos. Daí a importância da adoção da AP na evolução do processo de gerenciamento da fertilidade do solo na produção agrícola. Com a distribuição pontual dos insumos além de homogeneizar a fertilidade do solo possibilita uma economia com aquisição dos insumos, em virtude de um melhor controle na distribuição.

4 CONCLUSÕES

O conhecimento com o uso de softwares geoestatístico e da variabilidade espacial possibilita a utilização de técnicas que almeje padronizar os valores médios dos atributos da fertilidade do solo.

Com esse estudo vimos que produtores agrícolas utilizam de forma inadequada insumos como o gesso por falta de conhecimento técnico detalhado, ou orientações técnicas que não levam em consideração a heterogeneidade e particularidades de suas áreas agrícolas. Por consequência, tem-se visto impactos ambientais e prejuízos econômicos nestas áreas, pois o uso excessivo deste insumo pode elevar o custo total de produção, provocar lixiviação de nutriente, conseqüentemente, contaminação do lençol freático.

Por isso, o estudo da variabilidade da fertilidade do solo em áreas cultivadas pode auxiliar no planejamento agrícola e tomada de decisões sobre o uso racional de corretivos. Para tal, tem-se utilizado a AP para se estabelecer a variabilidade, maximizar a produtividade e minimizar os impactos negativos ao meio ambiente. A partir das análises de solos em malhas amostrais georreferenciadas, ou seja, com coordenadas conhecidas, pode-se realizar análises geoestatísticas para se determinar a heterogeneidade de uma área agrícola, elaborar mapas de correções de solo a partir da necessidade real e particularidades de cada local.

A utilização de distribuição de insumos com taxa variada por meio do mapeamento das áreas com uso de softwares geoestatístico, é um dos elementos para alcançar a produtividade desejada nas culturas implantadas nas propriedades e aperfeiçoar a eficiência do manejo do solo, além de proporcionar uma economia considerável na quantidade de insumos distribuídos no solo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. S.; GUIMARÃES, E. C. Geoestatística para determinação e modelagem da variabilidade espacial de micronutrientes no solo cultivado com cafeeiro no município de Araguari, MG. **Cultura agrônômica**, Araguari, MG, v. 26, n. 2, p.158-173, 2017.
- BARBIERI, D. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos de um argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. **Engenharia agrícola**, Piracicaba, SP, v.28, n.4, p.645-653, 2008.
- BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de ciência e tecnologia**, Alta Floresta, MT, v.32, n.1/2, p.205-221, 2015.
- 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**, Fortaleza, CE, v.44, n.1, p.1-9, 2013.
- CARNEIRO, J. S.; MARTINS, A. C. M.; FIDELIS, R. R.; NETO, S. P.; SANTOS, A. C.; SILVA, R. R. Diagnóstico e manejo da variabilidade espacial da fertilidade do solo no cerrado do Piauí. **Revista de ciências agroambientais**, Giubúes, PI, v.14, n.2, 2016.
- CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Engenharia agrícola**, Piracicaba, SP, v. 25, n. 2, p. 377-384, 2005.
- DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema plantio direto. **Revista ciência agrônômica**, Fortaleza, CE, v.43, n.3, p. 453-461, 2012.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Tecnologia de produção de soja: região central do Brasil 2014.** Londrina, PR, Embrapa Soja, 2013.
- GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: Resultados de um novo olhar**. Brasília, DF. Embrapa, 2014b. cap. 5, p. 74-83.
- 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 agrônômica**, Fortaleza, CE, v.47, n.2, p.247-255, 2016.

HURTADO, S.M.C.; RESENDE, A.V.; CORAZZA, E.J.; SHIRATSUCHI, L.S.; HIGASHIKAWA, F.S. Otimização da adubação em lavoura com altos teores de potássio no solo: uso de agricultura de precisão. In: **SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE CERRADO**. Brasília – DF, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, Campinas, SP, v.2, n.1, p.19-33, 2006.

MIRANDA, C. S.; FILHO, A. C. P.; LASTORIA, G. Aplicação da geoestatística no estudo da variabilidade espacial da piezometria. In: **XVII Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto**, 2015. Anais... João Pessoa, PB, 2015.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba, SP, 2010. p.83.

MONTARINI, R.; LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; FERRARI, S.; QUEIROZ, H. A. Correlação dos componentes vegetativo da cultura da pupunha e dos atributos químicos do solo. **Revista de agricultura neotropical**, Cassilândia, MS, v.3, n.2, p.25-33, 2016.

NEGREIROS NETO, J.V.; SANTOS, A.C.; GUARNIERI, A.; SOUZA, D.J.A.T.; DARONCH, D.J.; DOTTO, M.A.; ARAÚJO, A.S. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema plantio direto. **Ciências Agrárias**, Londrina, PR, v.35, n.1, p.193-204, 2014.

RAGAGNIN, V. A.; SENA JÚNIOR, D. G.; NETO, A. N. S. Recomendação de calagem a taxa variada sob diferentes intensidades de amostragem. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, PB. v.14, n.6, p.600-607, 2010.

RAIJ, B. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, SP: Instituto Agrônômico, 2001.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, MG, 1999, 359 p.

RICHART, A.; PICCIN, A. L.; KONOPATZKI, M. R. S.; KAEFER, K. A. C.; MORATELLI, G.; KAEFER, J. E.; ECCO, M. Análise espaço-temporal de atributos químicos do solo influenciados pela aplicação de calcário de cloreto de potássio em taxa variável. **Revista scientia agraria paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, PR, v.15, n.4, p.391-400, 2016.

ZANÃO JÚNIOR, L.A.; LANA, R.M.Q.; CARVALHO-ZANÃO, M.P.; GUIMARÃES, E.D. Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em

um Latossolo em sistema de plantio direto. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v.57, n.3, p.429-438, 2010.