

GLORIA MILENA ROJAS PLAZAS

**ANÁLISE ESPACIAL DA PRODUÇÃO DE CENOURA IRRIGADA
CORRELACIONADA COM ATRIBUTOS DO SOLO E DA PLANTA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Rubens Alves de Oliveira

Coorientadores: Job Teixeira de Oliveira
Sanzio Mollica Vidigal

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R741a
2023
Rojas Plazas, Gloria Milena, 1991-
Análise espacial da produção de cenoura irrigada
correlacionada com atributos do solo e da planta / Gloria Milena
Rojas Plazas. – Viçosa, MG, 2023.
1 dissertação eletrônica (67 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Rubens Alves de Oliveira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2023.
Referências bibliográficas: f. 62-67.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.368>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Agricultura de precisão. 2. Análise de trilha (Estatística).
3. *Daucus carota* - Cultivo - Métodos estatísticos. 4. Análise
multivariada. 5. Geologia - Métodos estatísticos. I. Oliveira,
Rubens Alves de , 1961-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 631.3


GLORIA MILENA ROJAS PLAZAS

**ANÁLISE ESPACIAL DA PRODUÇÃO DE CENOURA IRRIGADA
CORRELACIONADA COM ATRIBUTOS DO SOLO E DA PLANTA**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 GLORIA MILENA ROJAS PLAZAS
Data: 16/06/2023 18:25:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gloria Milena Rojas Plazas
Autora

Documento assinado digitalmente
 RUBENS ALVES DE OLIVEIRA
Data: 20/06/2023 18:21:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rubens Alves de Oliveira
Orientador

OFEREÇO

À minha maravilhosa família, meus pais, José Ismael Rojas Vaca e Gloria Inés Plazas Sierra; e meus irmãos, Luz Mila, Alberto, Jenni e Sebastián; sem vocês, nada. Muito obrigada por acreditarem que a educação é o caminho. Muito obrigada por apoiarem meus sonhos e projetos. Muito obrigada por colocarem o vento ao meu favor e me permitirem voar; e especialmente, muito obrigada por serem meu refúgio, meu porto seguro, o lar ao qual eu posso voltar. Amo vocês com todo meu coração.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, minha família e todas as pessoas que acompanham meu caminho. Por me permitir estar aqui, cumprindo um sonho muito grande e importante para mim. Por estar sempre do meu lado, guiando meus passos.

À Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao grupo lamaguti Agronegócios Ltda, por amavelmente permitir a coleta das amostras de cenoura e solo para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Dr. Rubens Alves de Oliveira, pela guia, dedicação, sabedoria e grandes ensinamentos tanto acadêmicos como pessoais. Muito obrigada pelo apoio e confiança no meu trabalho.

Ao meu coorientador, professor Dr. Job Teixeira de Oliveira, pela ajuda na coleta de amostras e dados em campo e pelos valiosos ensinamentos acadêmicos, críticas e sugestões.

Aos professores da Universidade Federal de Viçosa que contribuíram para meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao Policarpo, servidor do laboratório de hidráulica, pela disponibilidade e ajuda durante a condução das análises físicas do solo.

Aos meus amigos Tayssa e Felipe, vocês foram as primeiras pessoas que eu conheci no mestrado e se tornaram meus grandes amigos. Muito obrigada pela ajuda no processamento das amostras de cenoura no laboratório, pelos momentos compartilhados na sala, pelas conversas, risadas, comida, momentos de descontração... enfim... muito, mas muito obrigada pela sua amizade que espero seja para a vida toda.

Aos meus amigos de sempre, Diana, Jefferson, Javier, Julián e Oscar por acreditarem em mim muito mais do que eu mesma acredito. Por me apoiar, escutar, aconselhar e inspirar. Sou absolutamente feliz de ter vocês por perto, caminhando ao meu lado nessa jornada maravilhosa que é a vida.

À conexão cósmica em Viçosa, Javier Loaiza e Javier Falconí; muito obrigada pela amizade de vocês, pelo companheirismo, pelas risadas e pelas experiências juntos; levarei essas lembranças sempre no meu coração.

Ao meu amigo Erli, pelas conversas interessantes e conselhos na hora certa.

Às minhas amigas da república Michelle e Carla, por me acolherem e me fazerem sentir em casa.

Aos meus amigos Shirley, Edison, Tatiana, Adelaide, Mayara, Robson, Jeny, Lucas, Pablo, Jhoan, Inácio, por toda a conversa e amizade.

Aos colegas do Centro de Referência em Recursos Hídricos (CRRH), e todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Muito obrigada por todos os momentos compartilhados. Desejo para vocês todo o sucesso do mundo!

“Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado”.

(J.R.R.Tolkien – O senhor dos anéis)

RESUMO

PLAZAS, Gloria Milena Rojas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2023. **Análise espacial da produção de cenoura irrigada correlacionada com atributos do solo e da planta.** Orientador: Rubens Alves de Oliveira. Coorientadores: Job Teixeira de Oliveira e Sanzio Mollica Vidigal.

A caracterização da variabilidade e dependência espacial dos atributos físico-químicos do solo, atributos da planta e produtividade da cultura de cenoura é essencial para avaliar a resposta da cultura a práticas de manejo a sítio específico, possibilitando melhores resultados no aumento da produtividade e mantendo ou melhorando a qualidade do solo. Objetivou-se nesta pesquisa determinar como a produtividade da cultura de cenoura irrigada é afetada pela variabilidade espacial dos atributos físico-químicos do solo e pelos atributos de produção e crescimento da cultura. O estudo foi desenvolvido na safra 2021 em área de produção comercial, em Campos Altos, MG, Brasil, numa cultura de cenoura irrigada por pivô central. Na área irrigada foram estabelecidos 100 pontos amostrais distribuídos em uma área quadrada de 40.000 m², posicionados nos centros de quadrículas 20 x 20 m. Em cada ponto, foram avaliadas as seguintes variáveis: produtividade da cenoura; os atributos da planta: massa fresca e seca de raiz, comprimento de raiz, diâmetro de raiz, diâmetro do colo, diâmetro do coração, massa fresca e seca de folha, comprimento da folha, número de folha, razão parte aérea/raiz, índice de área folhar e NDVI; os atributos físicos do solo: densidade do solo, densidade de partícula, porosidade total, resistência a penetração nas camadas 0,00 a 0,10 m; 0,10 a 0,20 m; 0,20 m a 0,30 m e 0,30 m a 0,40 m; umidade volumétrica, conteúdo de umidade gravimétrico em capacidade de campo e ponto de murcha permanente, disponibilidade total de água no solo; os atributos químicos do solo: pH, nitrogênio total, fósforo disponível, potássio disponível, boro disponível, ferro disponível, cálcio trocável, magnésio trocável, acidez potencial, soma de bases, capacidade de troca catiônica efetiva, capacidade de troca catiônica potencial, saturação por bases, fósforo remanescente, condutividade elétrica e o parâmetro externo irrigação. Realizou-se análise estatística e geoestatística para analisar a variabilidade e dependência espacial dos atributos físico-químicos do solo e da planta. Foi possível constatar baixa a média variabilidade na produtividade da cultura e nos atributos da planta. Por outro lado, evidenciou-se que os atributos físico-químicos do solo que apresentaram um coeficiente de variação maior do que 20%,

indicando alta heterogeneidade, foram a resistência à penetração nas camadas 0,00m a 0,30m; o fósforo disponível, potássio disponível, magnésio trocável, boro disponível, ferro disponível e a condutividade elétrica. Dentre as variáveis que apresentaram dependência espacial, o menor alcance correspondeu a 40 m para densidade de partícula, sendo este o alcance mínimo recomendado para estudos posteriores em cultura de cenoura irrigada. As variáveis que melhor estimaram a variabilidade espacial da produtividade da cenoura foram os atributos da planta: diâmetro do ombro e diâmetro da ponta da raiz; e os atributos físico-químicos do solo: disponibilidade total de água no solo e capacidade de troca catiônica potencial, mostrando correlação espacial positiva. As variáveis massa de raiz, diâmetro do colo, seguidos do diâmetro do ombro e diâmetro do coração, apresentaram correlação direta com a produtividade da cenoura.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Análise de trilha. *Daucus carota* L. Estatística multivariada. Geoestatística.

ABSTRACT

PLAZAS, Gloria Milena Rojas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2023. **Spatial analysis of irrigated carrot yield correlated with soil and plant attributes.** Adviser: Rubens Alves de Oliveira. Co-advisers: Job Teixeira de Oliveira and Sanzio Mollica Vidigal.

The characterization of the variability and spatial dependence of soil physical-chemical attributes, plant attributes and productivity of the carrot crop is essential to evaluate the crop's response to management practices at a specific site, enabling better results in increasing productivity and maintaining or improving soil quality. The objective of this research was to determine how the productivity of the irrigated carrot crop is affected by the spatial variability of soil attributes and phenological indices of the plant. The study was developed in the 2021 crop year in a commercial production area in Campos Altos, MG, Brazil, in a carrot crop irrigated by a central pivot. In the irrigated area, 100 sample points were established and distributed in a square area of 40,000 m², positioned in the centers of 20 x 20m squares. The following variables were evaluated: carrot yield; the plant attributes: root fresh and dry mass, root length, root diameter, neck diameter, heart diameter, leaf fresh and dry mass, leaf length, leaf number, aerial part/root ratio, leaf area index, and NDVI; the soil physical attributes: soil density, particle density, total porosity, penetration resistance in the layers 0.00 to 0.10 m; 0.10 to 0.20 m; 0.20 m to 0.30 m and 0.30 m to 0.40 m; volumetric moisture, gravimetric moisture content at field capacity and permanent wilting point, total soil water availability; the soil chemical attributes: pH, total nitrogen, available phosphorus, available potassium, available boron, available iron, exchangeable calcium, exchangeable magnesium, potential acidity, sum of bases, effective cation exchange capacity, potential cation exchange capacity, base saturation, remaining phosphorus, electrical conductivity and the external irrigation parameter. Statistical and geostatistical analysis was carried out to analyze the variability and spatial dependence of physical-chemical soil and plant attributes. It was possible to verify a low to medium variability in crop yield and plant attributes. On the other hand, it was evident that the physical-chemical soil attributes that presented a coefficient of variation higher than 20%, indicating high heterogeneity, were the penetration resistance in the layers 0.00m to 0.30m; the available phosphorus, available potassium, exchangeable magnesium, available boron, available iron, and electrical

conductivity. Among the variables that showed spatial dependence, the smallest range corresponded to 40 m for particle density, this being the minimum recommended range to be adopted for further studies in irrigated carrot cropping. Within the cokriging framework, the variables that best estimated the spatial variability of carrot yield were the plant attributes: shoulder diameter and root tip diameter; and the physical-chemical soil attributes: total soil water availability, and potential cation exchange capacity, showing positive spatial correlation. By means of the path analysis, it was found that the variables root mass, neck diameter, followed by shoulder diameter, and heart diameter, showed a direct correlation with carrot productivity.

Keywords: Precision Agriculture. Path analysis. *Daucus carota* L. Geostatistics. Multivariate statistics.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
	2.1 A cultura da cenoura	14
	2.2.1 Fatores da planta.....	14
	2.2.2 Fatores do solo que influenciam no crescimento da cultura de cenoura.....	15
	2.2 Conceitos gerais da agricultura de precisão	15
	2.3 Conceitos gerais da geoestatística	17
3.	MATERIAL E MÉTODOS	19
	3.1 Área de estudo	19
	3.2 Amostragem de solo	22
	3.3 Amostragem de Planta	25
	3.4 Parâmetros de Irrigação	26
	3.5 Análise estatística e geoestatística	30
	3.6 Análise de trilha	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
	4.1 Irrigação	32
	4.2 Análise Estatística descritiva	33
	4.2.1 Análise de fertilidade do solo.....	37
	4.3 Análise Geoestatística	40
	4.4 Rede de Correlações e Análise de trilha	56
5	CONCLUSÕES.....	60
6	RECOMENDAÇÕES	61
7	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A cenoura (*Daucus carota* L.) é uma olerícola pertencente à família Apiaceae. É uma raiz nutritiva amplamente cultivada em nível mundial, reconhecida por ser uma boa fonte de carotenoides, vitaminas e fibras dietéticas, sendo também rica em minerais e antioxidantes (Rajpurohit, 2018; Que et al., 2019). No contexto da agricultura brasileira, a cenoura é uma das hortaliças mais consumidas, sendo cultivada em todo o país. Minas Gerais é o estado com maior destaque na produção de cenoura, devido especialmente ao alto nível tecnológico adotado na região de São Gotardo, sendo esta responsável por aproximadamente metade da cenoura produzida no Brasil (Carvalho et al., 2021).

O desenvolvimento, produtividade e qualidade das lavouras de cenoura estão influenciadas por fatores pedoclimáticos, variedade e práticas agronômicas e de manejo (Guimarães et al., 2018). Estes fatores determinam a produtividade máxima que será alcançada e a quantidade de insumos que serão consumidos para o desenvolvimento da cultura.

Entre as práticas agronômicas, focadas especialmente ao aumento da produtividade da cultura, a irrigação é uma técnica eficiente. Um manejo adequado da irrigação na lavoura é importante para o êxito da cultura. A irrigação influencia diretamente no incremento da produtividade e qualidade das raízes, incluindo um aumento no teor de carotenoides, fibras dietéticas e sabor (Marouelli et al., 2007; Reginaldo et al., 2021).

Por outro lado, fatores pedológicos, como parâmetros físicos e químicos do solo, podem impactar no desenvolvimento, produtividade e qualidade do produto. Segundo D'Hooghe et al. (2018) as cenouras são sensíveis às flutuações de disponibilidade de água no solo, disponibilidade de nutrientes, taxas de aeração e taxas de infiltração. O crescimento das raízes pode ser restringido por fatores mecânicos, como alta densidade do solo ou presença de pedras; e fatores químicos, como capacidade de retenção de nutrientes, levando a impactos negativos no rendimento e na qualidade das raízes.

Diferentes estudos têm sido desenvolvidos a fim de avaliar a resposta da cenoura a diferentes práticas de manejo. Silva et al. (2021) estudaram a combinação de irrigação e fertilizante no aumento do rendimento e lucro econômico na produção de cenoura, encontrando que a combinação da irrigação com o adubo permite uma

otimização desses recursos, obtendo assim uma resposta superior em comparação com a aplicação isolada. Montazar et al. (2021) por sua parte, avaliaram a variabilidade espacial da captação e remoção de nitrogênio e evapotranspiração real no sistema de produção de cenoura no deserto da Califórnia. Os autores não encontraram uma relação significativa entre o rendimento da raiz fresca da cenoura e a taxa de aplicação de nitrogênio nas faixas examinadas. Montazar et al. (2021) argumentaram que uma taxa de nitrogênio requerido menor que o aplicado poderia explicar a falta de resposta do rendimento à aplicação de nitrogênio. Szelag-Sikora et al. (2019) analisaram o impacto dos sistemas de produção integrados e convencionais nos parâmetros do solo na produção de cenoura, sugerindo que o fator que determina o nível de rendimento da cultura é a riqueza do solo em nutrientes. Szelag-Sikora et al. (2019) enfatizaram a importância da manutenção dos parâmetros adequados do solo e a gestão racional de nutrientes como elementos estratégicos em sistemas de produção.

Com base nos trabalhos apresentados tem-se que o estudo e a caracterização da variabilidade espacial de fatores físico-químicos do solo, tanto estáticos, (por exemplo, textura) quanto dinâmicas (por exemplo, conteúdo de umidade, compactação, condutividade elétrica e teor de nutrientes, entre outros), são indispensáveis para avaliar a resposta da cultura a uma prática de manejo a sítio específico. As lavouras de cenoura constituem um alto valor econômico. Assim, estudos que permitam otimizar o manejo da cultura baseados em técnicas de agricultura de precisão são justificados, o que vai possibilitar uma delimitação de zonas para um manejo diferenciado (Wei et al., 2020), promovendo melhores resultados no aumento da produtividade e mantendo ou melhorando a qualidade do solo.

A aplicação da geoestatística permite caracterizar a estrutura e magnitude da dependência espacial dos parâmetros físico-químicos do solo, os índices fenológicos da planta e a produtividade da cultura de cenoura. Isso possibilita a definição de regras de manejo que promovam um melhor gerenciamento dos insumos consumidos para o ótimo desenvolvimento da cultura sem afetar a produtividade e qualidade do produto. Por outro lado, os estudos de análise de trilha permitem entender as causas envolvidas nas associações entre atributos e desdobrar as correlações definidas em efeitos diretos e indiretos de atributos, por meio de uma variável principal, como a produtividade, e as variáveis explicativas (Andreomar et al., 2001), permitindo estudos

para fins de melhoramento da cultura. Assim objetivou-se na presente pesquisa: i) Avaliar a variabilidade espacial dos índices fenológicos da planta e atributos físico-químicos do solo em uma cultura de cenoura cultivada sob irrigação; ii) Caracterizar as intercorrelações espaciais da produtividade da cenoura irrigada com os parâmetros físico-químicos do solo e os índices fenológicos da planta; iii) Estabelecer os efeitos diretos e indiretos, por meio da análise de trilha, das variáveis morfológicas da planta sobre a produtividade da cenoura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da cenoura

A cenoura (*Daucus carota* L.) é uma espécie herbácea bienal, originária na Ásia Central e amplamente cultivada no mundo inteiro. Tornou-se uma cultura importante graças a seus abundantes benefícios para a saúde humana, sendo rica em nutrientes e vitaminas (Que et al., 2019). No Brasil, a cenoura é uma das cinco principais hortaliças cultivadas. As regiões de São Gotardo – MG, microrregião de Irecê – BA, Cristalina – GO, Marilândia do Sul – PR e caixas do sul – RS são as principais produtoras no país. Anualmente são cultivados cerca de 20 mil hectares de cenoura (Carvalho et al., 2021).

2.2.1 Fatores da planta

As cenouras têm raízes fibrosas que se estendem diretamente de uma raiz principal que emerge da semente. As cenouras dão prioridade da parte aérea durante um longo período após a emergência, podendo alcançar a capacidade fotossintética máxima em 90 a 130 dias após a semeadura (Johansen et al., 2015).

Em referência aos requerimentos nutricionais, a cenoura é uma cultura exigente, devido principalmente ao seu ciclo curto (90 – 130 dias) e sua elevada produção de massa seca (Pelá et al., 2018). A característica mais importante para garantir a absorção de nutrientes em cenouras, especialmente do fósforo, é uma grande área radicular por unidade de peso da planta (Johansen et al., 2015).

Níveis de fertilidade adequados no solo e crescimento constante são necessários para produção de carboidratos e sua posterior translocação das folhas até as raízes (Agbede et al., 2017). Alguns estudos desenvolvidos na região do Rio

Alto Paranaíba, nos quais foram testadas diversas cultivares de cenoura em diferentes épocas do ano, constataram que a ordem decrescente dos principais nutrientes captados e exportados pela cultura é potássio, nitrogênio, cálcio, fósforo, magnésio e ferro (Aquino et al., 2015; Dezordi et al., 2015). Adicionalmente, Carvalho et al., (2021) indicaram que a cultura é particularmente exigente aos micronutrientes boro e zinco, tanto que é indicada aplicação desses nutrientes no momento de plantio dessa hortaliça. A deficiência de cálcio é difícil de ser verificada nas condições em campo, já que a técnica de calagem neutraliza a acidez do solo e disponibiliza este nutriente para as plantas. Em solos com necessidade de calagem, é recomendável elevar a saturação por bases de 60 – 70%, e o teor de magnésio ser mínimo de 0,8 cmol_c/dm³ (Ribeiro et al., 1999).

2.2.2 Fatores do solo que influenciam no crescimento da cultura de cenoura

A cenoura desenvolve-se bem em solos bem estruturados, de textura média, com alto conteúdo de matéria orgânica e valores de pH próximos a 6,0 (Carvalho et al., 2021). A exploração do solo pelas raízes é comumente limitada por altos valores de resistência mecânica a penetração (Johansen et al., 2015). Estudos recentes mostram que os solos compactados, com resistências à penetração maiores do que 2 MPa, interferem substancialmente no crescimento da raiz, retardando seu alongamento pela metade da sua taxa desimpedida (Bengough et al., 2011; Hodge et al., 2009).

A cenoura é classificada como uma hortaliça sensível à salinidade. O valor máximo de condutividade elétrica tolerado é de 1,0 dS/m, estimando uma perda de produtividade de 14 % por unidade de dS/m a partir do limite (Ribeiro et al., 1999). Assim, um uso excessivo de fertilizantes pode causar fitotoxidez na planta; além de afetar a estrutura do solo, bem como sua composição físico-química e biológica (Onanuga et al., 2021).

2.2 Conceitos gerais da agricultura de precisão

Os avanços tecnológicos acontecidos nas últimas décadas têm permitido um desenvolvimento importante nos sistemas de produção agrícola. A revolução industrial possibilitou a introdução da mecanização e fertilizantes sintetizados na agricultura. A era tecnológica ofereceu inovações importantes em engenharia genética e

automação. A era da informação possibilitou a integração dos avanços tecnológicos na agricultura de precisão (Zhang et al., 2002).

A agricultura de precisão (AP) pode ser definida como *“a aplicação de tecnologias e princípios para gerenciar a variabilidade espacial e temporal associada a todos os aspectos da produção agrícola com o objetivo de melhorar o desempenho da cultura e a qualidade ambiental”* (Pederson et al., 2017). Para Sharma et al. (2021) a AP implica a implementação de tecnologias de informação, ferramentas de software e dispositivos inteligentes embarcados nas máquinas agrícolas para apoiar à tomada de decisões na agricultura.

A base fundamental da AP é o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo e planta dentro dos campos agrícolas (Zhang et al., 2002). Esse foco permite uma gestão de recursos mais precisa, possibilitando a aplicação de nutrientes, sementes, pesticidas, água, etc., em quantidades adequadas às condições do solo (Oliver, 2013). Segundo Liaghat et al. (2010) e Oliver, (2010) os protocolos para adoção de AP podem ser definidos em três componentes fundamentais: (1) Definição da variabilidade espacial mediante coleta de dados em uma escala apropriada, (2) interpretação da variabilidade mediante o processamento e análise das informações coletadas, e (3) implementação de mudanças no gerenciamento dos insumos em uma escala e tempo adequado. Liaghat et al. (2010) afirmam que, sendo a AP um processo cíclico no qual o sistema é ajustado a cada novo ciclo, as três etapas fundamentais exigirão um período de tempo para “gerar coletivamente uma estrutura estável e viável, ainda sujeita a alterações e refinamentos adicionais”.

O estudo das propriedades do solo e das culturas dentro dos campos precisa de informações suficientes para descrever sua variação. Não obstante, muitos dados usados em AP geralmente apresentam uma grande resolução espacial; ou seja, uma distância considerável entre pontos de amostragem (Oliver, 2010; Oliver, 2013), encontrando-se adicionalmente em formato vetorial de ponto (Radočaj et al., 2022). Assim, para elaboração de mapas detalhados que permitam representar uma área contínua a partir dos dados coletados, é necessário o uso de ferramentas de interpolação espacial que permitam estimar os valores das variáveis em locais não amostrados. Para isso, duas ferramentas principais podem ser utilizadas: uma convencional (usando ferramentas com base nos conceitos geoestatísticos), e uma moderna (baseado em tecnologias de aprendizado de máquinas) (Radočaj et al., 2022).

2.3 Conceitos gerais da geoestatística

A geoestatística é uma técnica moderna que fornece ferramentas para estimar com precisão valores de um atributo em pontos não amostrados, considerando a dependência ou autocorrelação espacial dos dados. A geoestatística é sustentada pelo pressuposto de estacionaridade, do qual é possível assumir que existe o mesmo grau de variação de um ponto para outro (Oliver et al., 2014).

O variograma é a ferramenta central da geoestatística (Oliver, 2013). Existem dois tipos de variograma: o variograma regional, estimado em uma região finita; e o variograma experimental, estimado a partir dos dados coletados (Oliver et al., 2014). O variograma experimental permite quantificar a autocorrelação espacial entre dois pontos de amostragem, descrevendo a variância dos dados de acordo com sua distância mútua (Radočaj et al., 2022); em outras palavras, o variograma experimental resume a variação dos atributos de um local para outro (Oliver, 2013).

O variograma experimental é estimado a partir dos dados $z(x_i)$, $i = 1, 2, \dots$, com a Equação 1 (Oliver et al., 2014)

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} \{z(x_i) - z(x_i + h)\}^2 \quad [1]$$

em que $z(x_i)$ e $z(x_i + h)$ são os valores da variável, Z , nas posições x_i e $x_i + h$, e $m(h)$ é o número de comparações pareadas em lag h , sendo h um vetor tanto na direção, quanto na distância.

O variograma experimental deve ser ajustado por um modelo que descreva a variação espacial. Na Figura 1 são apresentados os parâmetros do variograma. O intercepto positivo na ordenada é conhecida como efeito pepita (C_0), a qual representa a variação não explicada na escala de amostragem. O efeito pepita pode incluir os erros de medição, mas representa principalmente a variação ocorrida em distâncias menores que o intervalo de amostragem mais curto. Os variogramas sem ajuste, de efeito pepita puro, indicam na maioria dos casos que o intervalo de amostragem deveria ser menor para resolver a variação presente (Oliver, 2010; Oliver, 2013).

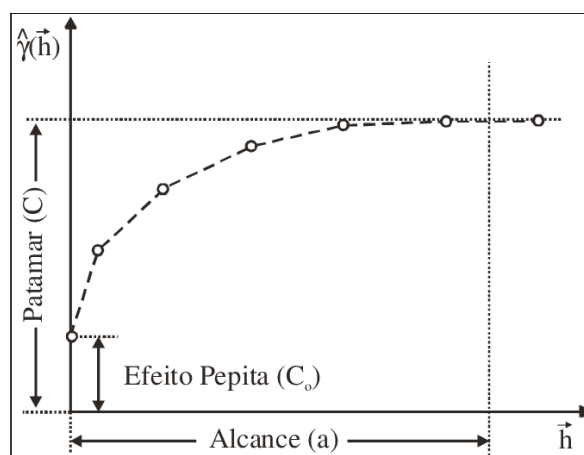


Figura 1. Parâmetros do semivariograma

Fonte: (Celso, 2015).

À medida que as distâncias entre os pontos aumentam, a variância aumenta à medida que os valores se tornam cada vez mais diferentes. A distância entre o efeito pepita e o patamar é conhecida como faixa de dependência espacial ou alcance (a). Deste ponto em diante, as amostras são consideradas não correlacionadas, ou seja, não existe mais dependência espacial entre elas e não afetam os valores previstos das propriedades avaliadas (Celso, 2015; Radočaj et al., 2022).

Os modelos experimentais ajustados fornecem os parâmetros de entrada para previsão espacial por krigagem (efeito pepita, patamar e alcance). A krigagem é um método geoestatístico de interpolação amplamente utilizado. É considerado um método ótimo de previsão devido a sua imparcialidade e variância mínima (Dey et al., 2017; Kingsley et al., 2019; Oliver et al., 2014; Oliver, 2010; Oliver, 2013; Qin et al., 2020). A krigagem utiliza os parâmetros obtidos no semivariograma experimental para prever o valor de uma propriedade em estudo, em qualquer ponto da área não amostrado, com base na medição em locais próximos.

A cokrigagem é uma extensão da krigagem univariada para um caso multivariado (Orejuela et al., 2021). Considera duas ou mais variáveis simultaneamente, desde que exista correlação espacial entre elas (Buttafuoco et al., 2016). A principal diferença entre os dois métodos de interpolação é que a krigagem usa apenas a função de correlação espacial de dados amostrados para estimar valores em locais não amostrados. Em contrapartida, a cokrigagem usa, além dessa correlação espacial, a correlação existente entre variáveis para melhorar a predição de um parâmetro em estudo (Orejuela et al., 2021). Assim, a cokrigagem permite a

estimativa de variáveis regionalizadas de difícil medição a partir de variáveis de fácil quantificação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A pesquisa foi realizada na safra do ano 2021, numa área de produção da fazenda lamaguti, pertencente ao grupo lamaguti Agronegócios Ltda., localizada em Campos Altos (19°25'16.8" S e 46°09'23.2" W, altitude média de 1200 m), estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 2). A cultura foi irrigada por pivô central.

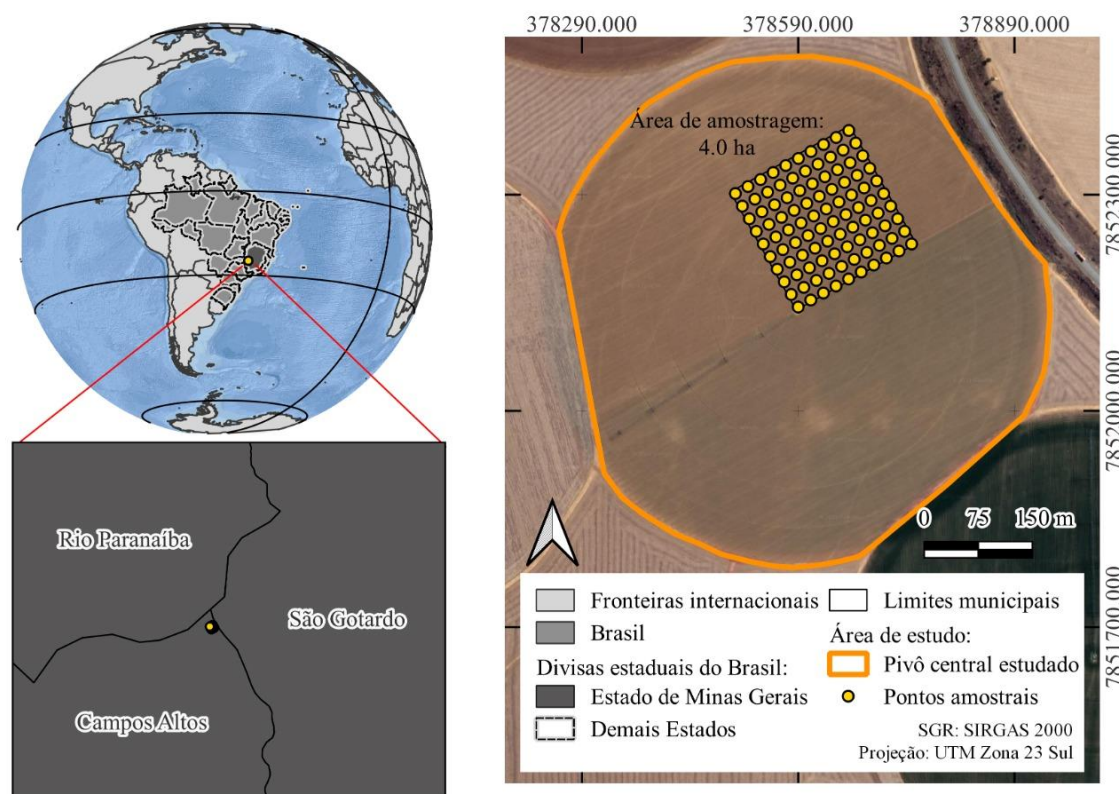


Figura 2. Localização da área de estudo

Fonte. O Autor (a projeção do pivô central foi tomada de Google Earth).

Segundo Beck et al. (2018) o clima prevalente da região corresponde ao tipo Cwa, de acordo com o critério de classificação de Köppen & Geiger; clima temperado úmido caracterizado por apresentar inverno seco e verão quente, com estações bem definidas. O período de chuvas é concentrado nos meses de outubro a março (Dezordi, Aquino, et al., 2015). Os solos predominantes da região são

classificados como Latossolos de textura consideravelmente argilosa (Santos et al., 2018; Silva et al., 2020).

O preparo do solo e o manejo da cultura seguiram o sistema de plantio convencional. A cenoura foi plantada mecanicamente no começo do mês de julho, em canteiros de 2 m de largura, contendo 5 fileiras de plantas em cada canteiro (Fig. 3), sob as práticas agronômicas resumidas na Tabela 1. Durante o preparo do solo, realizou-se uma aração, seguida de três gradagens e uma escarificação. No momento do plantio, foi passada uma enxada rotativa. O levantamento dos canteiros foi realizado mecanicamente com encanteirador.

Foi usada a cultivar Natuna, com uma densidade de sementeira de 681.818 sementes por hectare. Não foi feita calagem no solo para a safra em estudo, nem aplicado nenhum tipo de matéria orgânica no solo.



Figura 3. Disposição das fileiras de plantas de cenoura no canteiro

Fonte. Tadashi lamaguti.

Tabela 1 - Práticas agronômicas adotadas durante a safra avaliada

Prática	Data	Produto	Dose
Preparo do solo	Fim de jun. 2021		
Fertilização	Fim de jun. 2021	N3 P15 K15	1990
	Fim de jun. 2021	MC 60 YOORIN MASTER 1 SI	2159 kg ha ⁻¹
Semeadura	5,6,7/07/2021		
Controle	19/07/2021	Bravonil	2
		Gesagard	1
		Ampligo	0,25
	26/07/2021	Bravonil	2
		Gesagard	1
Controle	26/07/2021	Sencor Engeo Pleno	0,05 0,3 L ha ⁻¹

Continua...				
Fertilização	30/07/2021	N22 P00 K30	145	kg ha ⁻¹
Controle	02/08/2021	Priori Top	0,4	L ha ⁻¹
		Gesagard	1	
		Ampligo	0,25	
Controle	09/08/2021	Orkestra	0,35	L ha ⁻¹
		Gesagard	1	
	16/08/2021	Engeo Pleno	0,3	
		Priori Top	0,4	
Fertilização	20/08/2021	Gesagard	1	kg ha ⁻¹
		Ampligo	0,25	
		N22 P00 K31	154	
Controle	23/08/2021	Orkestra	0,35	L ha ⁻¹
		Poquer	0,5	
		Ochima	0,25	
	30/08/2021	Engeo Pleno	0,3	
		Priori Top	0,4	
Fertilização	20/08/2021	Sencor	0,0625	kg ha ⁻¹
		Ampligo	0,25	
		N22 P00 K31	154	
Controle	08/09/2021	Orkestra	0,35	L ha ⁻¹
		Engeo Pleno	0,3	
	13/09/2021	Priori Top	0,4	
		Afalón	1	
		Ampligo	0,25	
		Sencor	0,075	
Fertilização	23/09/2021	Orkestra	0,35	kg ha ⁻¹
		Engeo Pleno	0,3	
Controle	27/09/2021	Priori Top	0,4	L ha ⁻¹
		Ampligo	0,25	
	04/10/2021	Orkestra	0,35	
		Engeo Pleno	0,3	
	11/10/2021	Bravonil	2	
		Priori Top	0,4	
	18/10/2021	Ampligo	0,25	
		Orkestra	0,35	
		Sencor	0,125	
	25/10/2021	Engeo Pleno	0,3	
		Priori Top	0,4	
01/11/2021	Sencor	0,125		
	Ampligo	0,25		
08/11/2021	Bravonil	2		
	Orkestra	0,35		
	Engeo Pleno	0,3		
Coleta de amostras para estudo	17,18/11/2021	Priori Top	0,4	L ha ⁻¹
		Score	0,4	
		Ampligo	0,25	

3.2 Amostragem de solo

A locação dos pontos amostrais foi feita no dia 16/11/2021. A localização dos pontos amostrais foi definida pela sobreposição de uma grade quadrada, com pontos amostrais esquadrejados em malha de 20 x 20 m, totalizando 100 pontos amostrais. Na Figura 4 é apresentada a distribuição dos pontos adotados na malha amostral.

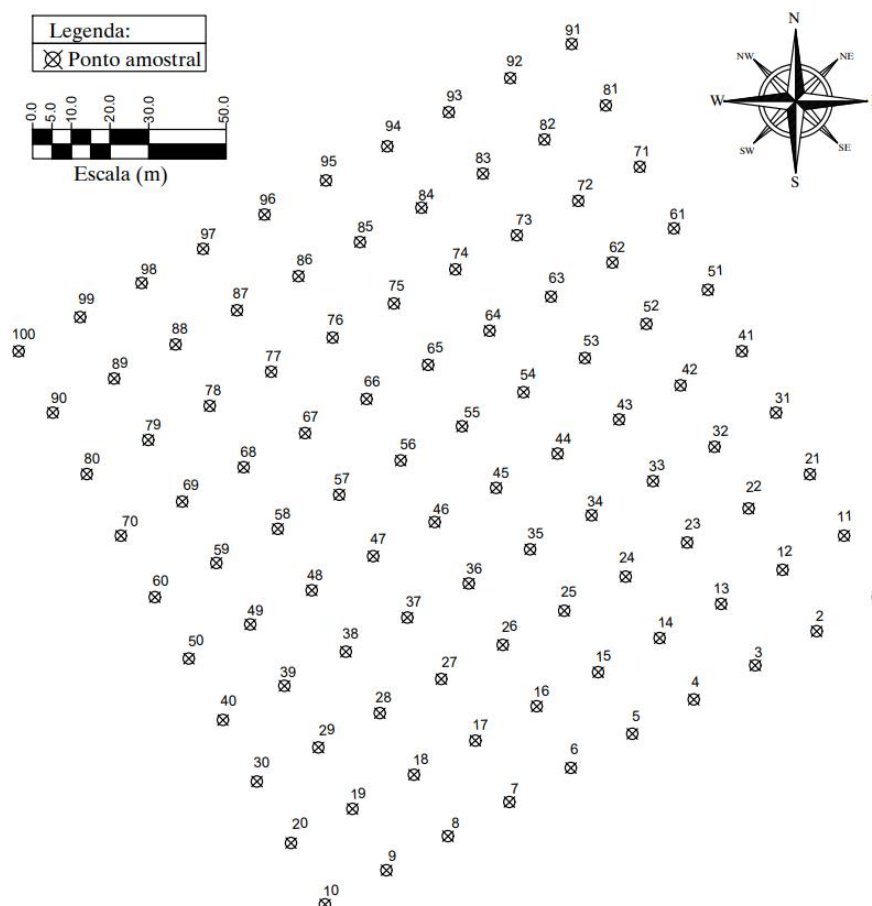


Figura 4. Malha de amostragem e detalhamento da amostragem feita na área de produção de cenoura irrigada por pivô central em Campos Altos, Minas Gerais, Brasil. Fonte. O Autor.

A coleta das amostras de solo indeformado foi realizada no dia 17/11/2021, na camada de 0,00 a 0,30 m, usando anéis de Kopecky, com diâmetro de 4,95 cm e altura de 5,09 cm. Com esta amostra determinou-se a umidade gravimétrica na capacidade de campo (U_{cc}), o ponto de murcha permanente (U_{PMP}), a densidade do solo (d_s), a densidade de partícula (d_p), a porosidade total (P_T) e a disponibilidade total de água no solo (DTA), para cada ponto amostral.

A capacidade de campo é considerada como sendo a umidade do solo retida na tensão de – 10 kPa para solos arenosos e – 30 kPa para solos argilosos. Os solos predominantes da região são classificados como Latossolos de textura consideravelmente argilosa (Santos et al., 2018; Silva et al., 2020). Diante disso, para determinação do conteúdo de umidade gravimétrica na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, as amostras foram submetidas à tensão de 30 kPa e 1500 kPa (Zonta et al., 2016), respectivamente. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa à temperatura de 105 °C até atingir peso constante, de acordo com Teixeira et al. (2017) e determinada a umidade com a equação :

$$U = \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \quad [2]$$

em que U corresponde ao conteúdo de umidade gravimétrica, em g g⁻¹, para umidade na capacidade de campo (U_{cc}) e umidade no ponto de murcha permanente (U_{PMP}); M_{su} à massa de solo úmido, em g, após ser submetido ao potencial estudado (30 kPa para U_{cc} e 1500 kPa para U_{PMP}); e M_{ss} à massa de solo seco a 105 °C após atingir peso constante, em g.

Para análise da densidade do solo (d_s) foi seguido o procedimento indicado por Almeida et al. (2017). Desta forma, foi coletada uma amostra indeformada em cada ponto da malha amostral, usando anéis de Kopecky de volume igual a 97,95 cm³, aproximadamente. Para obtenção da massa de solo seco (M_{ss}), as amostras foram secas em estufa a 105°C até atingir peso constante. A densidade de partícula (d_p) foi determinada com uso do método do balão volumétrico (Viana et al., 2017). Assim, determinou-se o volume de álcool necessário para completar o balão volumétrico de 50 mL, contendo solo previamente seco em estufa a uma temperatura de 105 °C. Foram aplicadas as equações 3 e 4 para obtenção da d_s e d_p, respectivamente. Na sequência, foi usada a Equação 5 para o cálculo da porosidade total do solo (P_T), em porcentagem (Almeida et al., 2017).

$$d_s = \frac{M_{ss}}{V} \quad [3]$$

$$d_p = \frac{Ma}{V_T - V_u} \quad [4]$$

$$P_T = \left(1 - \frac{d_s}{d_p}\right) * 100 \quad [5]$$

em que:

d_s = densidade do solo, em g cm^{-3} ;

M_{ss} = Massa de solo contida no anel de amostragem, seco em estufa a 105°C , em g;

V = Volume do anel, em cm^3 ;

d_p = densidade de partícula, em g cm^{-3} ;

M_a = Massa da amostra seca (aproximadamente 20 g), em g;

V_T = Volume total aferido do balão, em mL;

V_U = Volume utilizado para completar o balão com a amostra, em mL; e

P_T = Porosidade total, em %.

A disponibilidade total de água no solo (DTA) representa a água nele armazenada entre as umidades correspondentes à capacidade de campo e ponto de murcha permanente (Bernardo et al., 2019). A DTA, em mm cm^{-1} , foi obtida mediante a seguinte equação:

$$DTA = \frac{U_{cc} - U_{pmp}}{10} * d_s \quad [6]$$

A resistência à penetração (RP), em MPa, foi determinada em 4 profundidades: de 0,00 a 0,10 m; 0,10 a 0,20 m; 0,20 m a 0,30 m e 0,30 m a 0,40 m, sendo também determinada a resistência à penetração média (RPM), em MPa, com profundidade de 0,00 a 0,40 m. A determinação da resistência do solo à penetração foi testada por meio de um penetrômetro eletrônico georreferenciado Falker modelo PLG 2040, configurado para registrar leituras a cada centímetro de profundidade, mantendo-se a velocidade de penetração constante. Adicionalmente, foi determinada a umidade do solo no momento da amostragem, usando o medidor eletrônico Falker HydroFarm, cujo sensor tem um comprimento de 20 cm, registrando o conteúdo de umidade em uma área de 30 cm de diâmetro.

Em cada de ponto de amostragem também foi coletada uma amostra de solo deformada para determinação dos atributos químicos do solo na camada de 0 a 0,30 m de profundidade. Segundo Aquino et al. (2015) e Dezordi et al. (2015), os principais nutrientes captados e exportados pela cultura de cenoura são o K, N, Ca, P, Mg, Fe e B. Diante disso, as amostras foram encaminhadas ao laboratório de Análise de Solo

do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, sendo determinados os teores de K, P, Fe e B disponível, em mg dm^{-3} ; Ca^{2+} e Mg^{2+} trocável, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; e N total, em dag kg^{-1} . Adicionalmente, foram determinadas a capacidade de troca catiônica efetiva (t), capacidade de troca catiônica potencial (T), acidez potencial (H+Al) e soma de Bases (SB), em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, a saturação por bases (V), em porcentagem, e o P-Rem, em mg L^{-1} .

3.3 Amostragem de Planta

Nos dias 18 e 19/11/2021, 167 dias após a semeadura da cenoura, foram realizadas amostragens de cinco plantas de cenoura em cada ponto amostral, de acordo com a malha apresentada na Figura 4. As plantas foram coletadas nas linhas centrais do canteiro para evitar os efeitos da bordadura. A coleta das amostras foi realizada quando a cenoura se encontrava no ponto de colheita.

Após colheita as plantas foram levadas ao laboratório e separada a parte aérea da raiz. A produtividade da cenoura (PRO), em t ha^{-1} , foi obtida por meio da massa fresca total das raízes coletadas. As raízes de cenoura foram classificadas de acordo com o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (2004), segundo o comprimento e diâmetro das raízes, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Classes de raízes de cenoura em função do comprimento e diâmetro

Classes	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)
Longa	17 - 25	< 5,0
Média	12 - 17	> 2,5
Curta	5 - 12	> 1,0

A medida do comprimento da raiz (CR) foi tomada no eixo, que vai do colo ao ápice da raiz, utilizando régua graduada em mm, e a unidade adotada foi cm. O diâmetro do ombro (DR1), diâmetro da ponta (DR2), diâmetro médio (DM), diâmetro do colo (DC) e diâmetro do coração (DCR) foi medido em mm. Os valores foram obtidos com uso de um paquímetro digital; em que DR1 refere-se ao diâmetro medido no ombro da raiz, DR2 ao diâmetro medido 2 cm acima do ápice da raiz e DRM ao diâmetro medido na metade da raiz. O comprimento da folha (CF) foi determinada utilizando régua graduada em mm, e a unidade adotada foi cm, sendo mensurada

desde o colo até a ponta da folha mais comprida. O número de folhas por planta (NF) foi determinado por meio de contagem direta.

Para determinação da massa de matéria seca, em g, as raízes e folhas foram secas em estufa de circulação de ar forçado a 65°C, até atingir massa constante. A relação parte aérea/raiz foi determinada pela razão entre a massa seca da parte aérea e a massa seca da raiz. O IAF foi obtido por meio do dispositivo eletrônico AccuPAR modelo LP-80, expresso em %.

3.4 Parâmetros de Irrigação

A lâmina de água necessária para o desenvolvimento da cultura foi fornecida por um sistema de irrigação por pivô central com as características técnicas apresentadas na Tabela 3. Para o cálculo da lâmina bruta teórica aplicada em cada ponto de amostragem foram levadas em consideração as vazões dos bocais e a distância entre saídas para cada lance do pivô fornecidas pelo fabricante. Assim, foi definido o centro do pivô, sendo este georeferenciado por GPS e incluído na malha de amostragem. Na sequência, com o uso do Software AutoCad, foi plotado o percorrer de cada emissor na volta do pivô, sendo estimada a lâmina teórica aplicada em cada ponto de amostragem, conforme apresentado na Figura 5. As cores representam os lances do pivô. A Figura 5 não inclui o total de lances instalados no pivô central, pois foram plotados somente os lances de abrangência da área amostral.

Tabela 3. Características técnicas do pivô central

PIVÔ MODELO 4871 - 8000 -VSL/5-749	
Raio até a última torre (m)	302,00
Comprimento da tubulação (m)	322,87
Alcance do canhão (m)	27,00
Graus de giro (°)	360,00
Área irrigada (ha)	38,46
Lâmina bruta (mm/dia)	9,28
Horas funcionamento/dia	21,00
Vazão (m ³ / h)	169,96
Tempo por volta (100%) (h/volta)	6,78

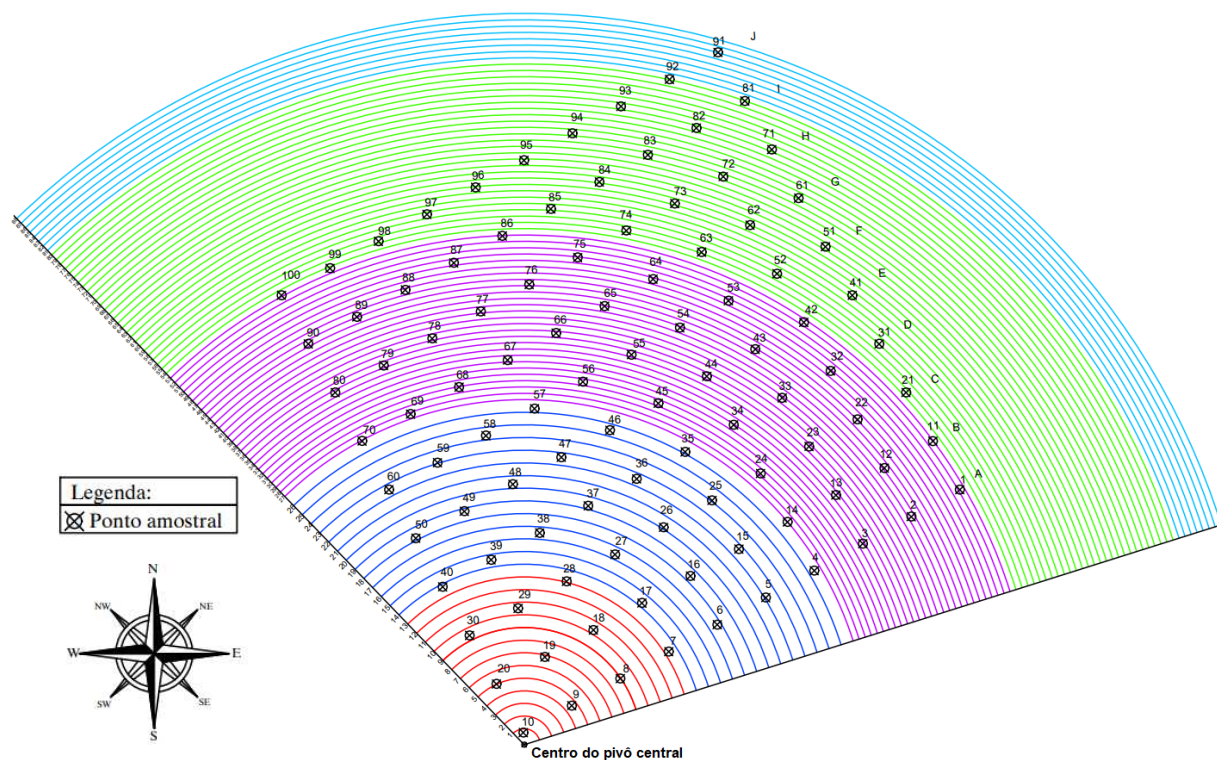


Figura 5. Esquema de distribuição dos emissores no pivô central e sua localização na malha amostral.

Fonte: O Autor.

Para o cálculo da lâmina teórica aplicada por cada volta do pivô central, assumindo regulagem de 100%, foi seguido o procedimento descrito na sequência. A separação entre saída de emissores fornecida pelo fabricante foi de 2,28 m, sendo que as duas primeiras saídas do lance 1 do pivô central não tinham aspessor instalado (Tabela. 4). O lance 1 e o lance 2 do pivô tinha um aspessor instalado a cada duas saídas, ou seja, com uma separação entre emissores de 4,56 m. A partir do lance 3 do pivô central todas as saídas continham um aspessor instalado, sendo assim a separação de 2,28 m entre aspessores. O pivô central era composto por 5 lances, além do vão em balanço, contendo no total 114 aspessores instalados.

Tabela 4. Número dos bocais instalados no pivô central

Nº	Lance 1	Lance 2	Lance 3	Lance 4	Lance 5	Balanco
1	-	-	15	15	17,5	19,5
2	-	12,5	12	15	17	19
3	6	-	12,5	15	17,5	19
4	-	13	12,5	15	17,5	19
5	6	-	12,5	15	17,5	19,5
6	-	13	12,5	15	17,5	19,5
7	6	-	12,5	15,5	17,5	19,5
8	-	13,5	13	15,5	17,5	19,5
9	7	-	13	15,5	17,5	18
10	-	14	13	15,5	18	11
11	7,5	-	13	15,5	18	-
12	-	14,5	13	16	18	-
13	8	-	13,5	16	18	-
14	-	15	13,5	16	18	-
15	9	-	13,5	16	18	-
16	-	15	13,5	16	18,5	-
17	9,5	-	13,5	16,5	18,5	-
18	-	15,5	14	16,5	18,5	-
19	10	-	14	16,5	18,5	-
20	-	16	14	16,5	18,5	-
21	10,5	-	14	16,5	18,5	-
22	-	16	14	16,5	19	-
23	11	-	14,5	16,5	19	-
24	-	16,5	14,5	17	19	-
25	11,5	-	14,5	17	-	-
26	-	17	14,5	17	-	-
27	12	-	15	17,5	-	-
TOTAL	13	13	27	27	24	10

Para o cálculo da lâmina bruta teórica, obteve-se o raio (m), o perímetro (m) e a área (m²) de abrangência de cada emissor. A área de abrangência foi calculada mediante a Equação 7, levando em consideração o perímetro percorrido por cada emissor e a distância entre emissores. O tempo por volta do pivô central, quando regulado em 100%, foi fornecido pelo fabricante, sendo esse de 6,78 horas por volta. Para o cálculo da lâmina bruta por volta, em mm, aplicada em cada ponto, foi usada a Equação 8

$$A = P * D_A$$

[7]

$$LB = \frac{Q * t}{A} * 1000 \quad [8]$$

em que:

A = Área de abrangência do emissor (em m²);

P = Perímetro percorrido pelo emissor (m);

D_A = Distância entre emissores (m);

LB = Lâmina bruta aplicada por volta (mm);

Q = Vazão teórica do emissor fornecida pelo fabricante para uma pressão de funcionamento de 10 PSI (em m³ h⁻¹); e

t = Tempo por volta do pivô central (em h).

Na sequência, com a lâmina bruta aplicada por volta, calculada para cada emissor, foi determinada a lâmina bruta teórica aplicada em cada ponto amostral. Para isso foi levado em consideração o percorrer dos emissores na área de amostragem apresentado na Figura 5. Para pontos amostrais que ficaram no meio entre dois emissores, a lâmina aplicada no ponto de amostragem foi calculada como a média entre as lâminas dos dois emissores. Por exemplo, o ponto amostral 9 ficou no meio do percorrer dos emissores 4 e 5, sendo a LB calculada como a média entre as LB dos emissores 4 e 5 do pivô central. Uma vez determinada a lâmina bruta teórica para cada ponto de amostragem, foi calculada a lâmina líquida teórica, em mm, conforme Equação 9. A eficiência de irrigação foi definida em 80%, sendo um valor possível de ser conseguido sob condições normais de dimensionamento e manejo (Bernardo et al., 2019).

$$LL = LB * 0,80 \quad [9]$$

Posteriormente, foi calculado o coeficiente de uniformidade de Christiansen teórico (CUC), conforme a equação 10.

$$CUC = 100 * \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n * \bar{X}} \right) \quad [10]$$

em que:

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen, em %;

X_i = Lâmina bruta ponderada para cada emissor, em mm; e

\bar{X} = Lâmina bruta média ponderada, em mm.

3.5 Análise estatística e geoestatística

Foi efetuada uma análise estatística inicial para cada índice fenológico da planta e parâmetro físico-químico do solo, utilizando o programa computacional Rbio versão 17. O software Rbio é gratuito e foi desenvolvido no ano 2016 por pesquisadores da Universidade Federal de Viçosa. O programa utiliza o software R como núcleo, permitindo a análise biométrica e estatística de dados (Bhering, 2017). Assim, foram analisados a média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio-padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria, sendo efetuada a análise da distribuição de frequência dos dados. Diante disso, a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade, foi avaliada mediante o teste de Shapiro e Wilk (1965), com significância a 5%, definindo o tipo de distribuição de frequência (Normal – NO; tendendo a normal – TN e indeterminados IN).

O estudo da variabilidade e dependência espacial para cada variável foi realizado mediante o software GS+. Assim, foram realizados os ajustes dos semivariogramas simples e cruzados, os quais forneceram os parâmetros de entrada para a interpolação espacial de krigagem e cokrigagem: efeito pepita (C_0), patamar (C_1) e alcance (A) (Qin et al., 2020). O grau de dependência espacial (GD) foi avaliado mediante o avaliador de dependência espacial (ADE; Equação 11), em que $GD \leq 25\%$ representam uma dependência espacial fraca, de 25 - 75% dependência espacial moderada e $\geq 75\%$ dependência espacial forte (Filho et al., 2011).

$$GD = ADE = \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) * 100 \quad [11]$$

Para definir o modelo do semivariograma experimental que melhor representa a distribuição espacial das variáveis em estudo, foram levados em consideração os seguintes parâmetros: (1) maior coeficiente de determinação (R^2); (2) maior avaliador de dependência espacial (ADE). A validação cruzada permitiu atestar o modelo que representou o melhor ajuste, além de definir o tamanho da vizinhança que forneceu a

melhor malha de krigagem. A validação cruzada foi representada de acordo com o coeficiente linear (a) e o coeficiente angular (b). Sendo assim, os melhores ajustes corresponderam a valores do coeficiente linear próximos ou iguais a 0 e coeficientes angulares próximos a 1 (Vieira et al., 2010).

Após o ajuste dos semivariogramas foi realizada a interpolação dos dados por krigagem ordinária, possibilitando a visualização dos padrões de distribuição espacial dos índices fenológicos da planta e os atributos físico-químicos do solo em uma cultura de cenoura irrigada na região de Campos Altos (MG – Brasil), por meio de mapas. Por outro lado, com o semivariograma cruzado verificou a existência de dependência espacial conjunta para as variáveis, permitindo a efetivação da cokrigagem (Lundgren et al., 2015).

3.6 Análise de trilha

Foi expressa graficamente a relação funcional entre as estimativas de correlação entre os traços mediante uma rede de correlações, na qual a proximidade entre nós (traços) foi proporcional ao valor absoluto entre sua correlação. As correlações positivas foram representadas em uma cor diferente das correlações negativas, para sua identificação.

Foi realizado o diagnóstico de multicolinearidade da matriz de correlações. O grau de multicolinearidade foi estabelecido com base em seu número de condição (NC), proposto por Montgomery et al. (1981); sendo considerada multicolinearidade fraca para $NC < 100$; multicolinearidade moderada a forte para $100 \leq NC \leq 1.000$; e multicolinearidade forte para $NC > 1.000$. Posteriormente, foram desdobradas as correlações, por meio da análise de trilha, em efeitos diretos e indiretos, considerando o modelo da Equação 12 (Laviola et al., 2016).

$$Y = p_1X_1 + p_2X_2 \dots p_nX_n + p\epsilon u \quad [12]$$

Em que Y corresponde à variável dependente principal (produtividade da cenoura); X1, X2, ..., Xn são as variáveis independentes explicativas (índices fenológicos da planta e parâmetros físico-químicos do solo) e p1, p2,,. pn são os coeficientes de análise de trilha.

As análises foram realizadas com auxílio do software GENES versão 20. O software foi desenvolvido com a finalidade de atender a área de genética e estatística experimental. É um software que permite a análise e o processamento de dados por meio de diferentes modelos biométricos e estatísticos (Cruz, 2013). A editora UFV publicou como suporte ao usuário, um primeiro manual de sua utilização em 1997. O software é distribuído sem nenhum custo para a comunidade científica, estando disponível no site da Universidade Federal de Viçosa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Irrigação

Os valores das lâminas brutas e líquidas teóricas aplicadas em cada ponto amostral por volta do pivô central com regulagem a 100% estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Lâmina bruta e líquida teóricas aplicadas em cada ponto amostral por volta do pivô regulado a 100%

Ponto	LB	LL	Ponto	LB	LL	Ponto	LB	LL
1	2,89	2,32	35	2,93	2,35	68	2,88	2,31
2	2,83	2,26	36	2,90	2,32	69	2,75	2,20
3	2,90	2,32	37	2,93	2,34	70	2,53	2,02
4	2,53	2,02	38	2,78	2,23	71	2,84	2,27
5	2,87	2,30	39	2,93	2,34	72	2,87	2,30
6	2,83	2,26	40	2,91	2,33	73	2,87	2,30
7	2,90	2,32	41	2,90	2,32	74	2,89	2,31
8	2,86	2,28	42	2,89	2,32	75	2,88	2,31
9	2,93	2,34	43	2,87	2,30	76	2,86	2,28
10	3,78	3,02	44	2,76	2,21	77	2,81	2,25
11	2,98	2,38	45	2,86	2,29	78	2,83	2,26
12	2,89	2,32	46	2,90	2,32	79	2,81	2,24
13	2,85	2,28	47	2,90	2,32	80	2,83	2,26
14	2,60	2,08	48	2,89	2,31	81	3,04	2,43
15	2,87	2,30	49	2,90	2,32	82	2,87	2,30
16	2,88	2,30	50	2,85	2,28	83	2,87	2,30
17	2,93	2,34	51	2,87	2,30	84	2,86	2,28
18	2,85	2,28	52	2,83	2,27	85	2,82	2,25
19	2,94	2,35	53	2,90	2,32	86	2,98	2,38
20	2,85	2,28	54	2,75	2,20	87	2,90	2,32
21	2,92	2,34	55	2,81	2,24	88	2,80	2,24
22	2,84	2,27	56	2,86	2,29	89	2,87	2,30

23	2,76	2,21	57	2,53	2,02	90	2,89	2,32
24	2,91	2,33	58	2,84	2,27	91	2,87	2,30
25	2,81	2,25	59	2,93	2,34	92	3,04	2,43
26	2,96	2,37	60	2,90	2,32	93	2,84	2,27
27	2,78	2,23	61	2,82	2,26	94	2,90	2,32
28	2,88	2,31	62	2,86	2,28	95	2,95	2,36
29	2,85	2,28	63	2,89	2,31	96	2,89	2,31
30	2,85	2,28	64	2,92	2,34	97	2,80	2,24
31	2,83	2,27	65	2,75	2,20	98	2,89	2,31
32	2,92	2,34	66	2,74	2,19	99	2,94	2,35
33	2,83	2,26	67	2,83	2,26	100	2,98	2,38
34	2,74	2,19						

LB: lâmina bruta teórica (em mm); LL: lâmina líquida teórica (em mm).

Observa-se na tabela 5 que as lâminas brutas e líquidas teóricas variaram de 2,53 a 3,78 mm por volta e 2,02 a 3,02 mm por volta, respectivamente. O coeficiente de uniformidade de Christiansen teórico obtido foi de 96,06 %. Segundo Bernardo et al. (2019), recomenda-se um valor de CUC maior ou igual que 90% para cultivares com um alto valor comercial, sendo o caso das culturas de cenoura. Diante disso, o CUC teórico calculado indica uma boa uniformidade de aplicação, estando acima do mínimo recomendado.

Não foi possível totalizar a lâmina de irrigação aplicada no ciclo vegetativo da cultura, pois não se tinha relato do número de dias que o pivô central funcionou irrigando. Diante disso, apenas foi avaliada a uniformidade teórica da lâmina aplicada para um evento de irrigação.

4.2 Análise Estatística descritiva

Mediante a distribuição de frequência, é possível observar o comportamento das variáveis em estudo, sendo a média a medida mais adequada para explicar a normalidade (Montanari et al., 2015). Os resultados da análise descritiva para todos os atributos da planta, apresentados na Tabela 6, indicaram ajuste à distribuição normal pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que suas respectivas probabilidades variaram de 0,057 a 0,728; à exceção do diâmetro da ponta (DR2), que apresentou uma distribuição do tipo tendendo a normal com probabilidade de 0,021.

Em referência aos atributos físicos do solo, as variáveis porosidade total (P_T), umidade volumétrica (UV), umidade em capacidade de campo (U_{CC}) e disponibilidade

total de água no solo (DTA) ajustaram-se à distribuição normal (NO), com probabilidades de 0,730; 0,936; 0,339 e 0,267; respectivamente. Por outro lado, a densidade de partícula (d_P), resistência à penetração nas profundidades 0,00 a 0,10 m; 0,30 a 0,40 m, resistência à penetração média (RP1, RP4 e RPM, respectivamente), e a umidade no ponto de murcha permanente (U_{PMP}) mostraram distribuição tendendo a normal (TN), com probabilidades de 0,026; 0,024; 0,014; 0,032 e 0,021; respectivamente. Já à resistência a penetração nas profundidades 0,10 a 0,20 m e 0,30 a 0,40 m (RP2 e RP3, respectivamente) apresentaram-se indeterminados (IN). Montanari et al. (2015) obtiveram distribuição normal para P_T e d_P , diferindo da distribuição obtida no presente trabalho para d_P .

Em relação aos atributos químicos do solo, o N, Ca, SB, t, T e P-Rem seguiram uma distribuição normal, uma vez que suas respectivas probabilidades foram de 0,139; 0,413; 0,211; 0,212; 0,131 e 0,170. O pH em H_2O , $H+Al$ e V, mostraram distribuição tendendo a normal; com probabilidades de 0,037; 0,013 e 0,032; respectivamente. Já os atributos P, K, Mg, B, Fe e CE foram indeterminados, com probabilidades respectivas de 0,009; 0,012; 1,52E-05; 1,92E-4; 1,02E-06 e 1,56E-03.

O coeficiente de variação (CV) é uma medida de dispersão que representa o desvio padrão em porcentagem da média. Ele, sendo um número abstrato, possibilita a comparação de variáveis mesmo em casos de unidades diferentes (Lopes et al., 2021). Segundo Pimentel-Gomes e Garcia (2002), o CV pode ser classifica em baixo, médio, alto e muito alto; sendo baixo para $CV < 10\%$, médio para $10\% \leq CV < 20\%$, alto para $20\% \leq CV < 30\%$, e muito alto para $CV \geq 30\%$. Os dados da Estatística descritiva para os atributos do estudo são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Estatística descritiva para a produtividade da cenoura, os atributos da planta e os atributos físico-químicos do solo

Atributo ^a	Média	Valor		Desvio padrão	variação (%)	Coeficiente		Probabilidade do teste ^b	
		Mínimo	Máximo			Curtose	Assimetria	Pr	DF ^c
PR	99,74	71,27	129,21	12,74	12,77	-0,39	0,24	0,341	NO
Atributos da Planta									
MFR	146,29	104,52	189,51	18,68	12,77	-0,39	0,24	0,341	NO
CR	19,62	17,24	22,28	1,09	5,53	-0,13	-0,01	0,538	NO
DR1	37,32	32,22	42,20	2,04	5,45	-0,40	-0,19	0,728	NO
DR2	22,60	18,34	26,22	1,50	6,64	0,10	-0,52	0,021	TN
DRM	29,41	25,14	32,78	1,70	5,79	-0,66	-0,18	0,362	NO
DC	11,06	8,86	13,02	0,95	8,55	-0,70	-0,01	0,371	NO
DCR	14,38	11,48	17,10	1,28	8,92	-0,63	0,06	0,206	NO
MFF	36,79	24,25	50,96	6,00	16,31	-0,57	0,13	0,482	NO
CF	59,86	52,92	66,36	2,84	4,75	-0,28	0,09	0,632	NO
NF	6,32	5,00	7,80	0,61	9,69	-0,33	0,07	0,263	NO
MSR	14,54	10,75	18,39	1,74	11,97	-0,69	-0,08	0,449	NO
MSF	4,95	2,91	7,06	0,80	16,15	-0,34	0,23	0,585	NO
RAR	0,34	0,25	0,46	0,05	13,71	-0,54	0,35	0,095	NO
IAF	3,55	1,50	5,51	0,87	24,40	-0,67	-0,06	0,523	NO
NDVI	0,92	0,91	0,94	0,01	0,71	-0,21	-0,33	0,057	NO
Atributos Físicos do Solo									
d _s	0,86	0,78	0,91	0,03	3,06	-0,20	-0,23	0,881	NO
D _p	2,82	2,56	3,14	0,12	4,36	-0,09	0,36	0,026	TN
P _T	69,56	65,33	73,34	1,62	2,33	-0,05	-0,05	0,730	NO
RP1	0,10	0,04	0,22	0,03	33,12	0,64	0,69	0,024	TN
RP2	0,31	0,17	0,80	0,08	25,51	14,31	2,69	6,12E-10	IN
RP3	0,69	0,33	1,18	0,18	26,57	-0,12	0,58	0,007	IN
RP4	1,54	1,01	2,21	0,26	17,23	-0,67	0,39	0,014	TN
RPM	0,66	0,43	0,92	0,12	17,44	-0,65	0,39	0,032	TN
UV	15,65	13,18	18,35	1,01	6,45	-0,23	0,09	0,936	NO
U _{cc}	0,30	0,28	0,32	0,01	3,00	-0,02	-0,27	0,339	NO
U _{PMP}	0,23	0,22	0,24	3,34E-03	1,46	-0,28	0,50	0,021	TN
DTA	0,61	0,44	0,79	0,08	12,54	-0,25	-0,11	0,267	NO
Atributos Químicos do Solo									
pH	6,12	5,79	6,55	0,17	2,73	-0,37	0,46	0,037	TN
N	0,12	0,10	0,14	0,01	7,37	-0,92	0,01	0,139	NO
P	44,4	26,8	69,80	9,56	21,51	-0,73	0,35	0,009	IN
K	46,7	29,0	69,0	9,62	20,58	-0,65	0,40	0,012	TN
Ca ²⁺	3,92	3,19	4,73	0,36	9,17	-0,53	0,08	0,413	NO
Mg ²⁺	1,00	0,58	1,65	0,25	25,18	-0,40	0,75	1,52E-05	IN
H+AL	5,03	3,70	6,40	0,60	11,87	-0,74	-0,23	0,013	TN
SB	5,03	3,94	6,27	0,56	11,05	-0,47	0,24	0,211	NO

Continua...

Atributo ^a	Média	Valor		Desvio Pa- drão	variação (%)	Coeficiente		Probabilidade do teste ^b	
		Mínimo	Máximo			Curtose	Assimetria	Pr>F	DF ^c
t	5,03	3,94	6,27	0,56	11,05	-0,47	0,24	0,212	NO
T	10,06	9,16	10,85	0,39	3,88	-0,69	0,17	0,131	NO
V	50,09	39,50	62,60	5,44	10,86	-0,57	0,39	0,032	TN
P-Rem	11,55	10,00	13,20	0,64	5,58	-0,60	-0,16	0,170	NO
B	0,86	0,45	1,70	0,27	30,93	0,36	0,83	1,92E-04	IN
Fe	44,39	32,80	67,60	8,96	20,18	0,02	0,95	1,02E-06	IN
CE	67,40	38,0	108,0	15,01	22,27	0,32	0,73	1,56E-03	IN
Irrigação									
IRR	2,55	2,25	3,36	0,11	4,39	26,46	3,15	3,97E-14	IN

^a PR: produtividade da cenoura (t ha⁻¹); **Atributos da planta:** MFR: massa fresca de raiz (g); CR: comprimento de raiz (cm); DR1: diâmetro do ombro (mm); DR2: diâmetro da ponta (mm); DRM: Diâmetro médio (mm); DC: diâmetro do colo (mm); DCR: diâmetro do coração (mm); MFF: massa fresca de folha (g); CF: comprimento de folha (cm); NF: número de folha (adimensional); MSR: massa seca de raiz (g); MSF: massa seca de folha (g); RAR: relação parte aérea/raiz (adimensional); IAF: índice de área folhar(%); NDVI: índice de vegetação da diferença normalizada; **Atributos físicos do solo:** d_s: densidade do solo (g cm⁻³); d_p: densidade de partícula (g cm⁻³); P_T: porosidade total (%); RP1, RP2, RP3, RP4, RPM: resistência à penetração (Mpa); UV: umidade volumétrica (%); U_{CC}: conteúdo de umidade em capacidade de campo (g g⁻¹); U_{PMP}: conteúdo de umidade em ponto de murcha permanente (g g⁻¹); DTA: disponibilidade total de água no solo (mm cm⁻¹ de solo); **Atributos químicos do solo:** pH: pH em água; N: nitrogênio total (dag kg⁻¹); P: fósforo disponível, K: potássio disponível, B: boro disponível e Fe: ferro disponível, em mg dm⁻³; Ca: cálcio trocável, Mg: magnésio trocável, H+Al: acidez potencial, SB: soma de bases, t: CTC efetiva, T: CTC potencial, em cmol_c dm⁻³, V: saturação por bases (%), P_Rem: fósforo remanescente, em mg L⁻¹; CE: Condutividade elétrica (μS cm⁻¹); **Irrigação:** IRR: lamina líquida por volta do pivô central (mm). ^bteste de Shapiro e Wilk. ^cdistribuição de frequência, NO: normal, TN: tendendo a normal, IN: indeterminado.

Diante do exposto, a produtividade da cultura da cenoura mostrou um CV médio igual a 12,77%, segundo apresentado na Tabela 6. Por outro lado, os atributos da planta apresentaram um grau de heterogeneidade variando de baixo a meio CV, com exceção do índice de área foliar (IAF), que apresentou um CV alto (24,4%). Assim, o comprimento de raiz (CR), diâmetro de raiz (DR1, DR2 e DRM), diâmetro do colo (DC), diâmetro do coração (DCR), comprimento e número de folha (CF e NF) e NDVI indicaram baixo CV, sendo o menor para o NDVI (0,71%) e o maior para NF (9,69%). Já os atributos massa fresca e seca de folha (MFF e MSF), massa fresca e seca de raiz (MFR e MSR) e relação parte aérea/raiz (RAR) apresentaram CV médio, variando de 11,97% para MSR a 16,31% para MFF.

Em relação aos atributos físicos do solo, a densidade de solo e de partícula (d_s e d_p), porosidade total (P_T), conteúdo de umidade volumétrico (UV), os parâmetros de umidade em capacidade de campo (U_{CC}) e ponto de murcha permanente (U_{PMP}) indicaram baixo grau de heterogeneidade, com CV's menores do que 10%. Montanari

et al., (2015) constataram que a variável P_T apresenta pouca variação espacial. A resistência à penetração na camada de 30 a 40 cm e a resistência à penetração média (RP4 e RPM), indicaram um grau de heterogeneidade média com CV de 17,23% e 17,44%, respectivamente; e um alto grau de heterogeneidade na camada de 10 a 20 cm (RP2) e 30 a 40 cm (RP3), com CV's de 25,51% e 26,57%, respectivamente. Por último, o coeficiente de variação da resistência à penetração na camada 0 a 10 cm foi muito alto (33,12%).

Para os atributos químicos do solo, os CV's situaram-se entre baixos a muito altos, com destaque para pH e T que apresentaram os menores valores de CV (2,73% e 3,88%, respectivamente), mostrando que estas são as variáveis com menor dispersão na área. Foi encontrado um CV baixo para os atributos N, Ca, T e P_{rem}, e CV médio para H+Al, SB, t e V. Já os atributos P, K, Mg, Fe e CE mostraram um alto grau de heterogeneidade no solo, com um alto CV. O B foi o atributo químico do solo com maior heterogeneidade, apresentando um CV de 30,93%. Os resultados estão de acordo com os resultados encontrados por Behera et al., (2018) para pH e B, tendo os autores supracitados obtido o menor CV para pH (7,72%) e o maior para o B (77,36%).

De maneira geral, os atributos da planta e a produtividade da cenoura apresentaram baixo a médio grau de heterogeneidade. Por outro lado, as propriedades físico-químicas do solo variaram de baixo a alto grau de heterogeneidade na área de estudo. A pouca variação dos atributos da planta e produtividade da cultura pode ser explicado pelo fato de que, mesmo apresentando uma grande variabilidade na área, os atributos físico-químicos do solo estiveram dentro das faixas em que não representaram restrição para o desenvolvimento das raízes. Não obstante, a avaliação da variabilidade espacial dos atributos, tanto da planta quanto do solo, segue sendo um fator de estudo importante para identificar possíveis problemas na área e potencializar o desenvolvimento da cultura, além de possibilitar o estabelecimento de um manejo a sítio específico mediante técnicas de agricultura de precisão.

4.2.1 Análise de fertilidade do solo

Seguindo a estatística descritiva, as amostras foram classificadas de acordo com as classes de fertilidade do solo proposta por Ribeiro et al. (1999), para os

diferentes atributos avaliados. Assim, o pH do solo variou de 5,79 a 6,55. Além disso, 24% do total de amostras apresentou valores de pH entre 5,79 e 6,0 considerados bom, nas demais os valores ficaram entre 6,1 e 6,55, considerada alto (Figura 6). Os resultados anteriores estão de acordo com os achados por Dezordi et al. (2015), que encontraram valores médios de pH em uma área de cenoura, na região do Alto Paranaíba, em torno de 6,3. Segundo Carvalho et al. (2021), a cenoura adapta-se melhor em solos com pH próximo a 6,0. Adicionalmente, e de forma generalizada, a maioria das hortaliças tem um melhor desenvolvimento com o pH do solo na faixa entre 5,5 e 6,5 (Embrapa, 1997). Nesta faixa de pH a disponibilidade dos nutrientes é favorecida. De acordo com os resultados os níveis de pH no solo não foram limitantes para o desenvolvimento da cultura.

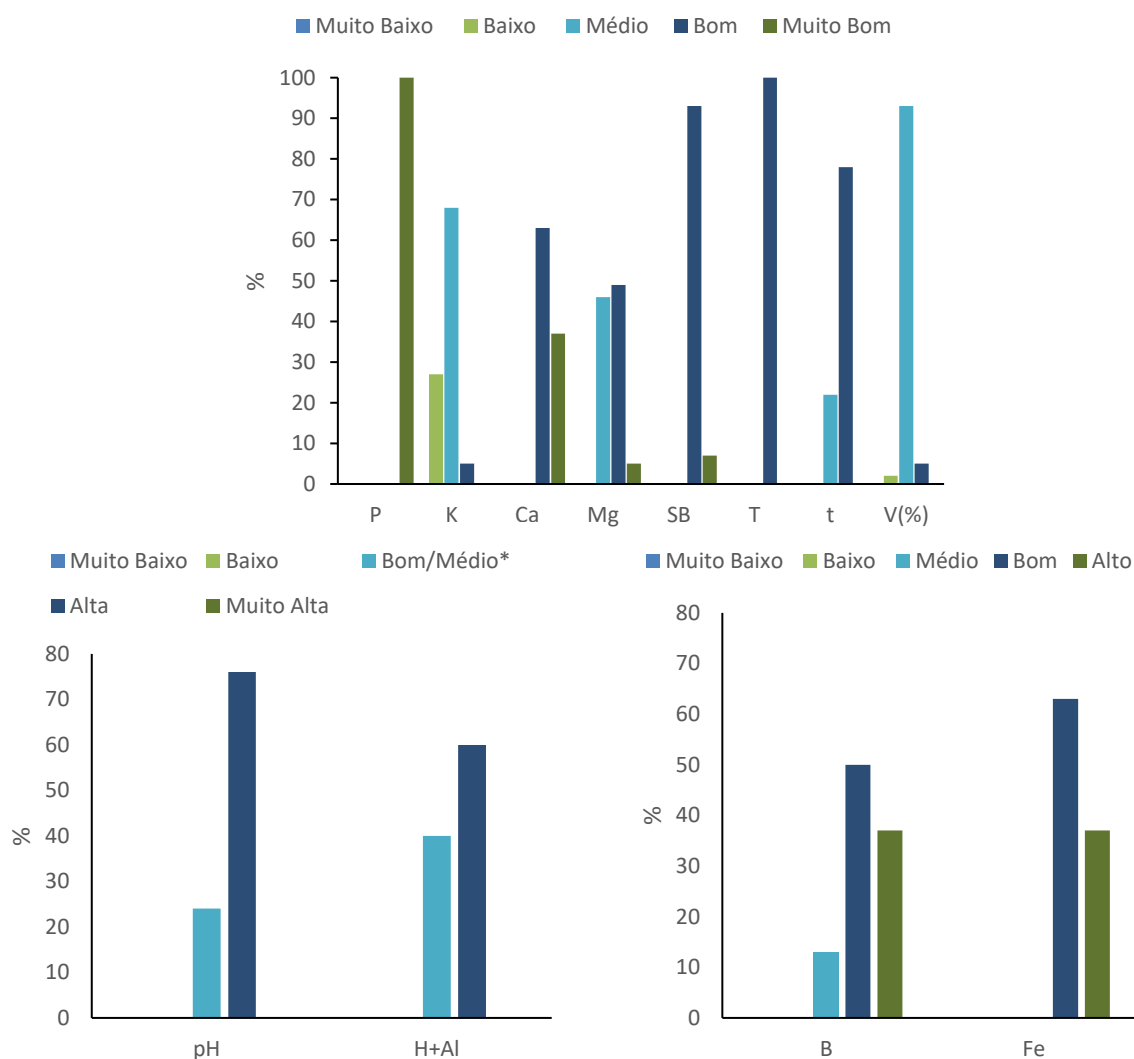


Figura 6. Frequência da classificação de amostras de fertilidade do solo em um campo de cenoura, Campos altos, (MG), Brasil. *Médio no caso de H+Al.

Os cátions trocáveis Ca e Mg variaram de 3,19 a 4,73 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e 0,58 a 1,65 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente. O Ca apresentou 63% do total de amostras localizadas na classe de boa fertilidade e 37% localizadas na classe muito boa. Por outro lado, para o Mg, 46% das amostras ficaram na classe média, 49% na boa e 5% na muito boa. Em relação ao K, que teve valores que variaram de 29,00 a 79,00 mg dm^{-3} ; 27 % das observações foram classificadas com nível de fertilidade baixo, 68% com nível médio e 5% com nível bom. Em relação à soma de bases (SB), que teve valores que variaram de 3,94 a 6,27 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, 93% das observações são de nível bom de acordo com a classificação proposta por Ribeiro et al. (1999).

Já a saturação por bases (V%) ficou na faixa de 39,50 a 62,60%; com 93% das amostras com status de classificação médio (V de 40,1 a 60,0%). Isso indica que aproximadamente metade da saturação do complexo coloidal do solo foi contribuição da acidez potencial (H+Al), que teve 40% das amostras com disponibilidade média e 60% com alta disponibilidade (H+Al entre 2,51 e 5,00 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; e 5,01 e 9,00 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente). Assim levando-se em consideração a faixa de saturação por bases indicada por Carvalho et al. (2021) para a cultura de cenoura (V entre 60% e 70%), recomenda-se fazer correção da acidez potencial do solo, afim de aumentar os níveis de cátions trocáveis que contribuam com a SB e, conseqüentemente, com a V do solo.

Para interpretação da disponibilidade de P no solo foi utilizado o valor de fósforo remanescente (P-Rem), sendo este uma medida relacionada com a capacidade tampão de fosfatos do solo (Ribeiro et al., 1999). Os valores de P variaram de 20, 30 a 77,50 mg dm^{-3} , apresentando 100% das amostras uma disponibilidade classificada como muito boa. O baixo valor do P-rem (11,55 mg L^{-1}) está em conformidade com Dezordi et al. (2015) e Dezordi et al. (2016), que indicaram que os solos da região possuem uma alta capacidade tampão para este nutriente, requerendo assim a adição de grandes quantidades de fertilizante ao solo para aumentar a fração de P disponível para a cultura.

Os micronutrientes B e Fe apresentaram valores de 0,45 a 1,70 mg dm^{-3} e 32,80 a 67,60 mg dm^{-3} , respectivamente. Para o B, 13% das observações tiveram disponibilidade média, 50% boa e 37% alta. Já o Fe apresentou 63% das amostras com boa disponibilidade e 37% com alta disponibilidade.

Em geral, os resultados não revelaram classificação de baixa disponibilidade para nenhum dos atributos avaliados na região de estudo, à exceção de 27% das

observações para o K. Não obstante, vale apontar que Aquino et al. (2015) constataram que a demanda de nutrientes da cenoura vai ser influenciada pela safra e pela cultivar. As interpretações dos resultados das análises de solos foram feitas com base no manual de recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, publicado em 1999 (Ribeiro et al.,1999), que não levam em consideração as novas cultivares/híbridos desenvolvidos, além da produtividade esperada ser inferior ao obtido em lavouras tecnificadas na região (Dezordi et al., 2015). Diante disso, seria importante quantificar a eficiência e recuperação de nutrientes pela cultivar Natuna, permitindo assim estimar a necessidade real de fertilizantes de acordo com a absorção de nutrientes requerida pela cultivar e safra em estudo, a fim de avaliar se possível uma economia, ou pelo contrário, maior demanda de fertilizantes.

4.3 Análise Geoestatística

Os parâmetros dos semivariogramas simples para a produtividade da cenoura, os atributos da planta e os atributos físico-químicos do solo estão apresentados na Tabela 7 e Figura 7. A análise geoestatística evidenciou efeito pepita puro para os atributos da planta; CR, DRM, MFF, MSR, MSF, RAR. De forma semelhante, os atributos físico-químicos do solo PT, RP1, d_s , pH, N, Mg, H+Al, SB, t, V, B e Fe não indicaram dependência espacial. Já os parâmetros CF, NDVI, RP3, RP4, UV, U_{cc} e U_{PMP} e IRR, indicaram tendência, ou seja, não apresentaram estabilização do peitoril do variograma.

Tabela 7. Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para a produtividade da cenoura, atributos da planta e atributos físico-químicos do solo

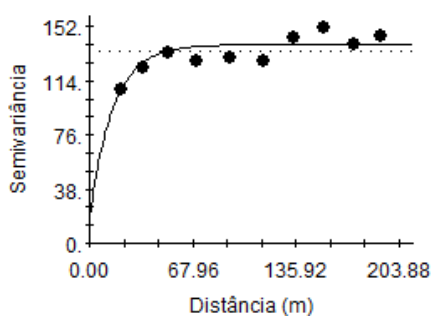
Atributo ⁽¹⁾	Modelo ⁽²⁾	Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₁)	Alcance (m)	r ²	SQR ⁽³⁾	ADE ⁽⁴⁾		Validação Cruzada ⁽⁵⁾		
							(%)	Classe	a	b	r
PR	EXP	18,60	140,0	47	0,63	541,00	86,70	Forte	23,58	0,76	0,33
Atributos da Planta											
CR	EPP	1,190	1,190	-	-	-	-	-	-	-	-
DR1	ESF	2,206	4,410	98	0,94	0,18	50,00	Moderada	2,79	0,93	0,47
DR2	EXP	0,850	2,420	98	0,93	0,07	64,90	Moderada	1,55	0,93	0,42
DRM	EPP	2,942	2,942	-	-	-	-	-	-	-	-
DC	EXP	0,420	0,840	120	0,89	0,01	50,00	Moderada	3,84	0,65	0,25
DCR	EXP	0,872	1,745	97	0,72	0,07	50,00	Moderada	3,23	0,78	0,35
MFF	EPP	34,380	34,380	-	-	-	-	-	-	-	-
NF	GAU	0,240	0,520	200	0,97	3,06E-03	53,80	Moderada	0,72	0,87	0,5
MSR	EPP	3,220	3,220	-	-	-	-	-	-	-	-
MSF	EPP	0,745	0,745	-	-	-	-	-	-	-	-
RAR	EPP	0,003	0,003	-	-	-	-	-	-	-	-
IAF	EXP	0,157	0,700	59	0,67	0,02	77,60	Forte	1,06	0,70	0,34
Atributos Físicos do Solo											
dS	EPP	0,001	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-
dP	GAU	0,007	0,014	40	0,74	5,07E-06	50,00	Moderada	0,99	0,65	0,26
PT	EPP	3,299	3,299	-	-	-	-	-	-	-	-
RP1	EPP	0,002	0,002	-	-	-	-	-	-	-	-
RP2	EXP	0,002	0,003	90	0,90	1,11E-07	43,60	Moderada	-0,02	1,06	0,37
RPM	ESF	0,005	0,010	91	0,97	3,06E-07	52,00	Moderada	0,00	1,00	0,59
UV	EXP	0,163	1,085	72	0,63	8,68E-02	85,00	Forte	0,09	0,99	0,47
DTA	GAU	0,005	0,009	180	0,83	4,09E-06	49,40	Moderada	-0,02	1,03	0,50
Atributos Químicos do Solo											
pH	EPP	0,026	0,026	-	-	-	-	-	-	-	-
N	EPP	1,00E-4	1,00E-4	-	-	-	-	-	-	-	-
P	EXP	33,700	211,400	59	0,40	5589,00	84,10	Forte	-1,32	1,03	0,43
K	ESF	69,900	144,300	134	0,92	363,00	51,80	Moderada	-1,70	1,03	0,50
Ca	EXP	0,021	0,135	42	0,42	1,06E-03	84,40	Forte	-1,20	1,31	0,41
Mg	EPP	0,066	0,066	-	-	-	-	-	-	-	-
H+AL	EPP	0,362	0,362	-	-	-	-	-	-	-	-
SB	EPP	0,325	0,325	-	-	-	-	-	-	-	-
t	EPP	0,325	0,325	-	-	-	-	-	-	-	-
T	EXP	0,017	0,182	92	0,86	1,32E-03	90,60	Forte	-0,32	1,03	0,64
V	EPP	29,100	29,100	-	-	-	-	-	-	-	-
P_Rem	EXP	0,060	0,455	70	0,71	0,01	86,80	Forte	1,86	0,84	0,404
B	EPP	0,133	0,133	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	EPP	107,608	107,608	-	-	-	-	-	-	-	-
CE	EXP	85,300	230,200	128	0,87	1096,00	62,90	Moderada	-	1,19	0,51

12,73

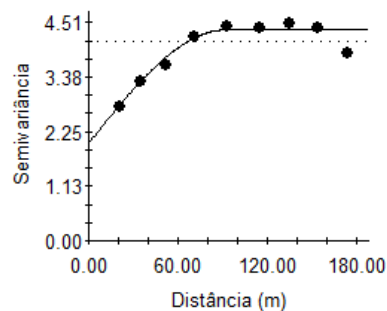
⁽¹⁾ PR: Produtividade da cenoura (t ha⁻¹); **Atributos da planta:** CR: comprimento de raiz (cm); DR1: diâmetro do ombro (mm); DR2: diâmetro da ponta (mm); DRM: diâmetro médio (mm); DC: diâmetro do colo (mm); DCR: diâmetro do coração (mm); MFF: massa fresca de folha (g); NF: número de folha (adimensional); MSR: massa seca de raiz (g); MSF : massa seca de folha (g); RAR: relação parte aérea/raiz (adimensional); IAF: índice de área folhar(%); **Atributos físicos do solo:** d_s: densidade do solo (g cm⁻³); d_p: densidade de partícula (g cm⁻³); P_T: porosidade total (%); RP1, RP2, RPM: resistência à penetração (MPa); UV: umidade volumétrica (%); DTA: Disponibilidade total de água no solo (mm/cm

de solo); **Atributos químicos do solo:** pH: pH em água; N: nitrogênio total (dag kg^{-1}); P: fósforo disponível, K: potássio disponível, B: boro disponível e Fe: ferro disponível, em mg dm^{-3} ; Ca: cálcio trocável, Mg: magnésio trocável, H+Al: acidez potencial, SB: soma de bases, t: CTC efetiva, T: CTC potencial, em cmolc dm^{-3} , V: saturação por bases (%), P_Rem: fósforo remanescente, em mg L^{-1} ; CE: condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$). ⁽²⁾ EXP: exponencial; EPP: efeito pepita puro; ESF: esférico; GAU: gaussiano; ⁽³⁾ soma de quadrado de resíduos; ⁽⁴⁾ avaliador da dependência espacial; ⁽⁵⁾ a: coeficiente linear, b: coeficiente angular.

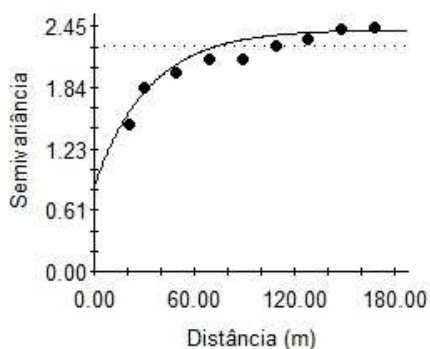
(a) Produtividade



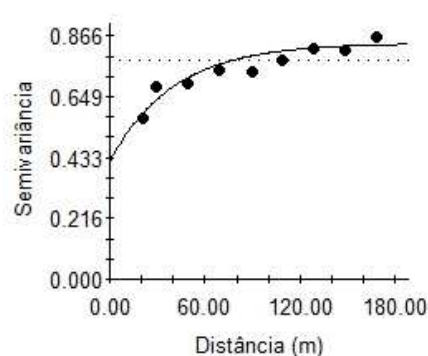
(b) Diâmetro do ombro



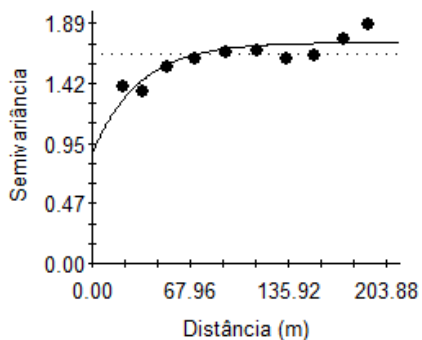
(c) Diâmetro da ponta



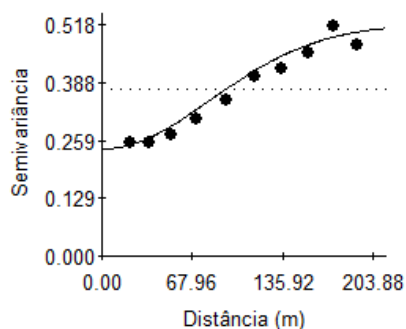
(d) Diâmetro do colo



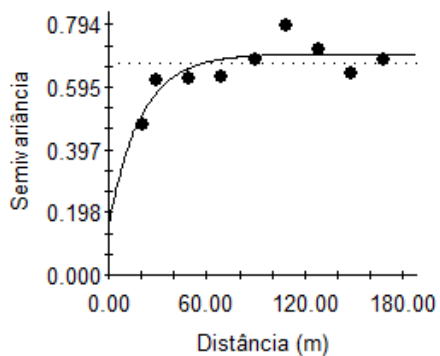
(e) Diâmetro do coração



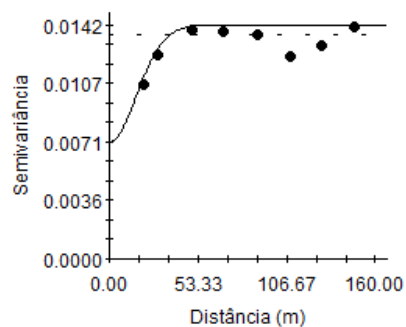
(f) Número de folha



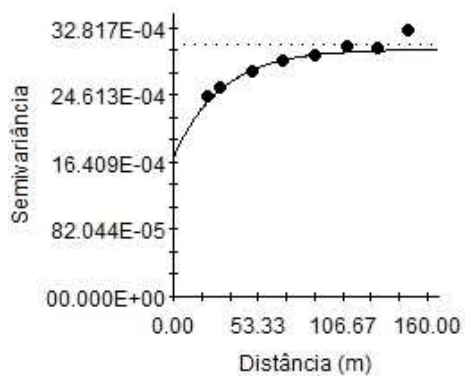
(g) índice de área foliar



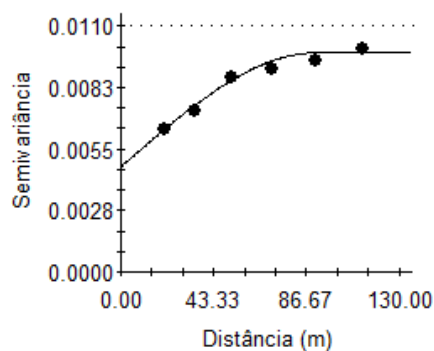
(h) Densidade de partícula



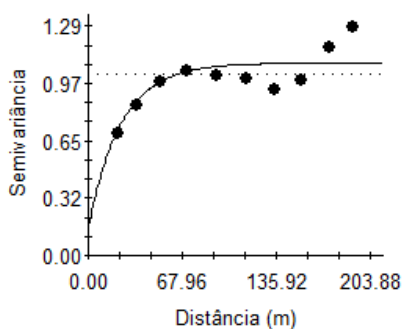
(i) RP de 10 a 20 cm



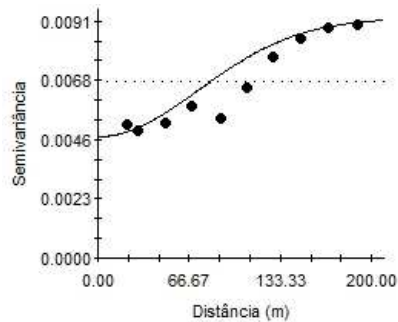
(j) RPM



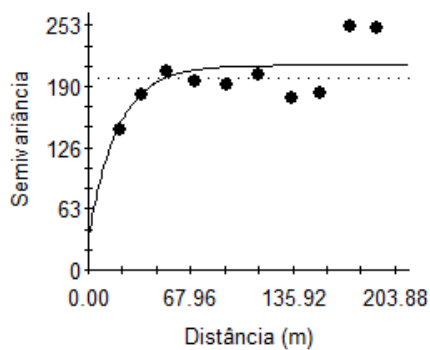
(k) Umidade volumétrica



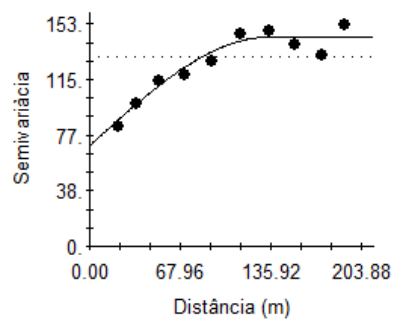
(l) DTA



(m) Fosforo Disponível



(n) Potássio disponível



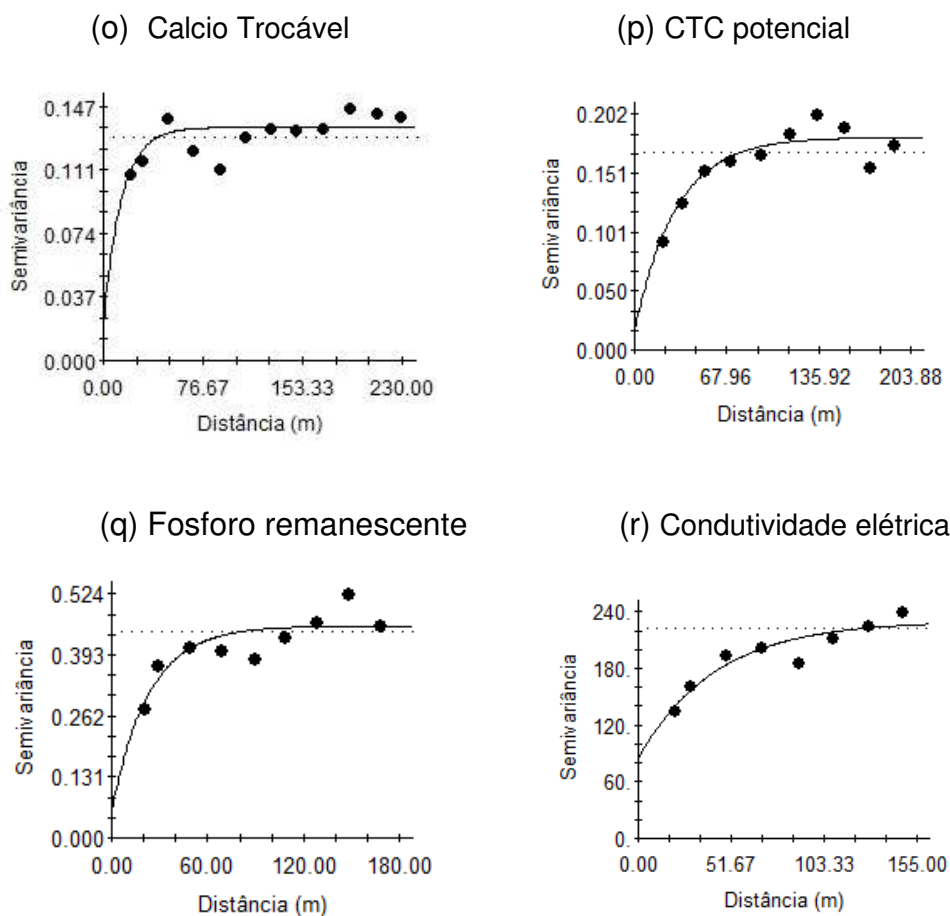


Figura 7. Semivariogramas simples ajustados para os índices fenológicos da cenoura e os atributos físico-químicos do solo, em que: (a) Produtividade da cenoura ($t\ ha^{-1}$); (b) diâmetro do ombro (cm); (c) diâmetro da ponta (cm); (d) diâmetro do colo (cm); (e) diâmetro do coração (cm); (f) número de folha (adimensional); (g) IAF= índice de área folhar (%); (h) densidade de partícula ($g\ cm^{-3}$); (i) resistência à penetração 10 a 20 cm de profundidade (MPa); (j) resistência à penetração média (MPa); (k) umidade volumétrica (%); (l) disponibilidade total de água no solo ($mm\ cm^{-1}$ de solo); (m) fósforo disponível, (n) potássio disponível, (o) cálcio trocável, (p) CTC potencial, em $cmol_c\ dm^{-3}$, (q) fósforo remanescente, em $mg\ L^{-1}$ (r) condutividade elétrica ($\mu S\ cm^{-1}$).

O valor médio da produtividade da cenoura foi de $99,74\ ton\ ha^{-1}$, sendo superior aos valores médios reportados por Carvalho et al. (2021) em cenoura irrigada na região de São Gotardo ($70\ t\ ha^{-1}$). Isso pode ser consequência da cultivar avaliada, dos parâmetros físico-químicos do solo no local de estudo ou mesmo das práticas agrônômicas seguidas pelo produtor.

O alcance do semivariograma corresponde à distância máxima dentro da qual existe correlação ou dependência espacial, sendo o principal parâmetro fornecido pela geoestatística. Além do alcance, o comportamento espacial da variável é completamente aleatório (Behera et al., 2018). Assim, observando os atributos da planta, verifica-se que as faixas de dependências espaciais foram grandes, variando de 46,8 m para produtividade a 200,0 m para o número de folhas. Já para os atributos

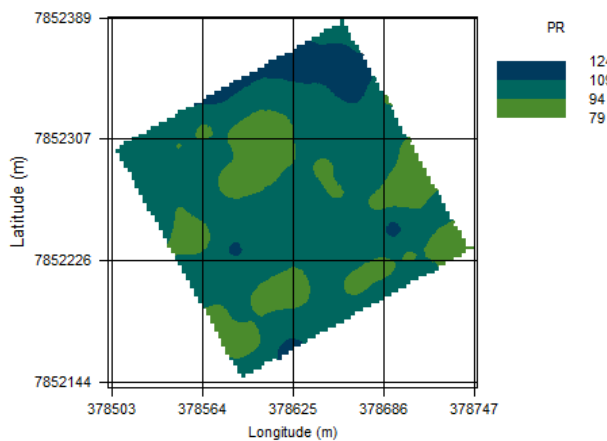
físicos do solo, o menor alcance foi de 40,0 m para a d_P e o maior de 180,0 m para a DTA. Em relação aos atributos químicos do solo, o alcance variou de 41,7 m para o cálcio até 134,0 m para o K. Os resultados das faixas de dependência espacial anteriores indicaram que o intervalo de amostragem recomendável varia dependendo do atributo em estudo. Não obstante, a fim de auxiliar planejamentos de amostragem futuras em estudos relativos aos índices fenológicos da planta e os atributos físico-químicos do solo em cultura de cenoura irrigada na região de Campos Altos, sugere-se que, no geral, não sejam maiores que os valores de intervalos apresentados no presente estudo (máximo 40 m).

O modelo de semivariograma exponencial foi o melhor ajuste para os atributos PR, DR2, DC, DCR, IAF, RP2, UV, P, Ca, T, P_Rem e CE apresentando R^2 de 0,63; 0,93; 0,89; 0,72; e 0,67; 0,90; 0,63; 0,40, 0,42; 0,86; 0,71 e 0,87; respectivamente. Para os atributos DR1, RPM e K foram ajustadas o modelo esférico com R^2 de 0,94; 0,97 e 0,92, respectivamente. Já as variáveis NF, d_P e DTA indicaram ajuste com um modelo gaussiano, com R^2 de 0,97; 0,74 e 0,83; respectivamente.

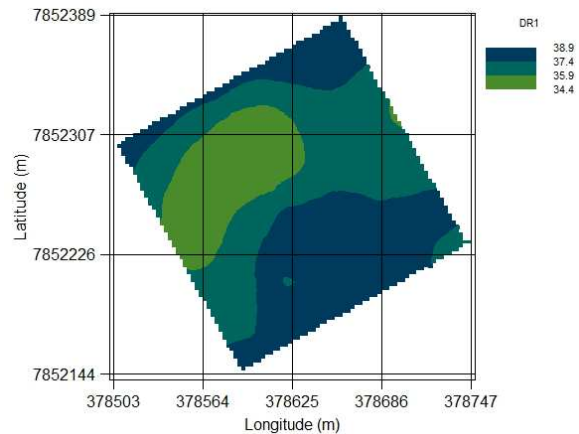
De acordo com a classificação de Cambardella et al. (1994), os valores do ADE de < 25%, 25 % a 75 % e > 75 % revelaram dependência espacial fraca, moderada e forte, respectivamente. Segundo os resultados dos variogramas dos dados de PR, IAF, UV, P, Ca, T e P_rem apresentaram ADE forte, enquanto DR1, DR2, DC, DCR, NF, d_P , RP2, RPM, K e CE indicaram ADE moderado. É importante ressaltar que, tanto nos valores do alcance quanto no grau de dependência espacial, foram encontradas variações dentre as variáveis analisadas. Segundo Najafian et al. (2012), a variabilidade espacial das propriedades químicas do solo pode ser influenciada por fatores intrínsecos (fatores de formação do solo) e extrínsecos (práticas de manejo, irrigação). Najafian et al., (2012), indicaram que uma forte dependência espacial das propriedades químicas do solo pode ser atribuída a fatores intrínsecos do solo, enquanto uma moderada a fraca dependência espacial vai depender de fatores extrínsecos.

A principal aplicação da geoestatística no estudo dos atributos fenológicos da planta e parâmetros físico-químicos do solo tem sido a estimativa e o mapeamento das propriedades em locais não amostrados (Najafian et al., 2012). As Figuras 8a a 8r apresentam os mapas de distribuição gerados por meio da krigagem ordinária após o ajuste dos semivariogramas, mediante os quais foi possível visualizar a variabilidade espacial dos diferentes atributos na área.

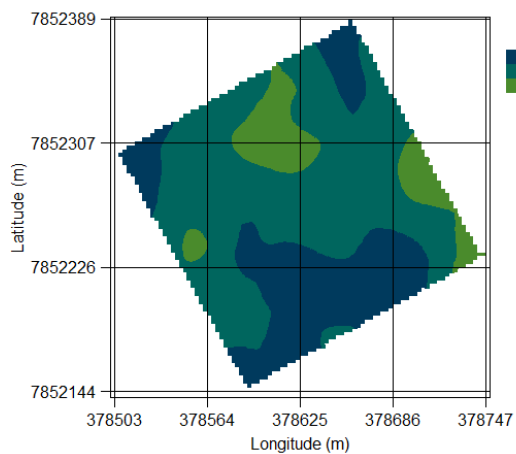
(a) Produtividade



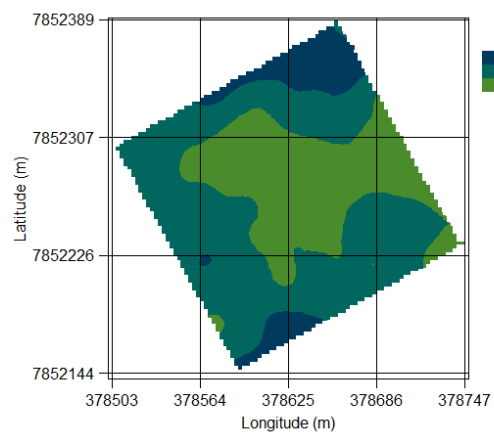
(b) Diâmetro do ombro



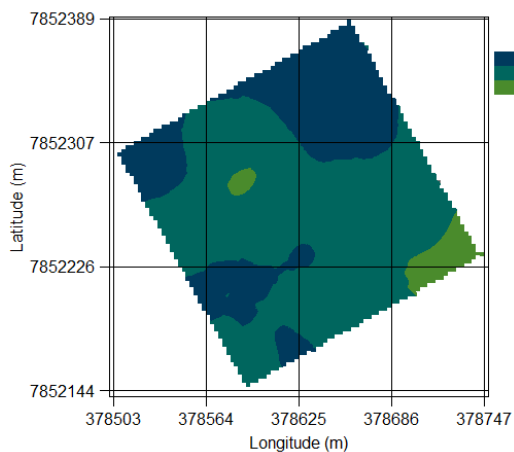
(c) Diâmetro da ponta



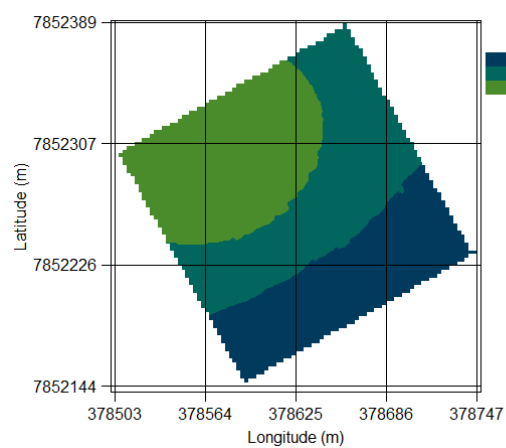
(d) Diâmetro do colo



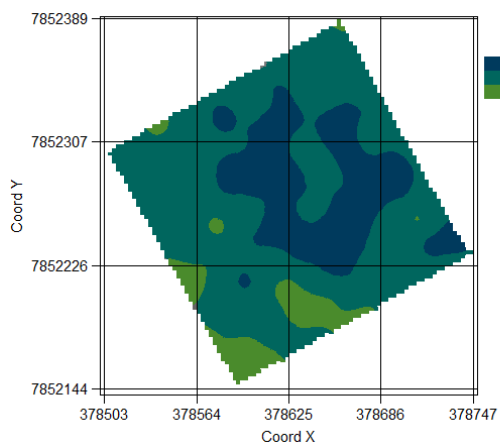
(e) Diâmetro do coração



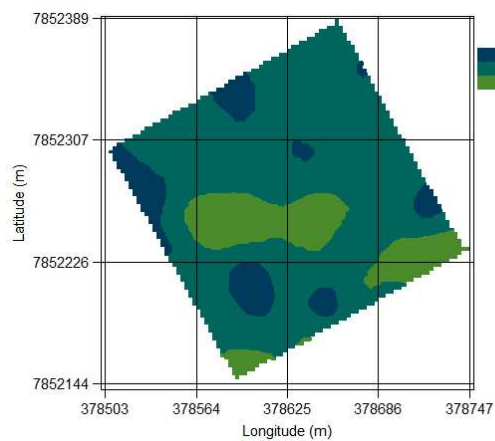
(f) Número de folha



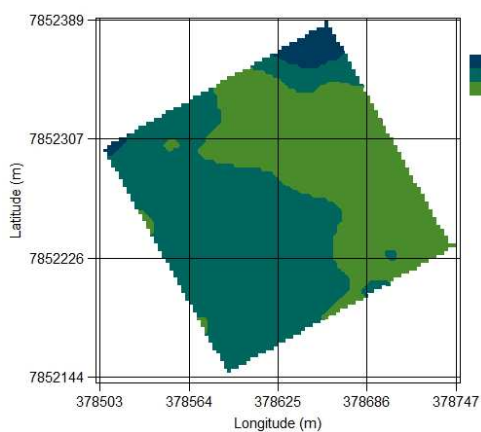
(g) índice de área foliar



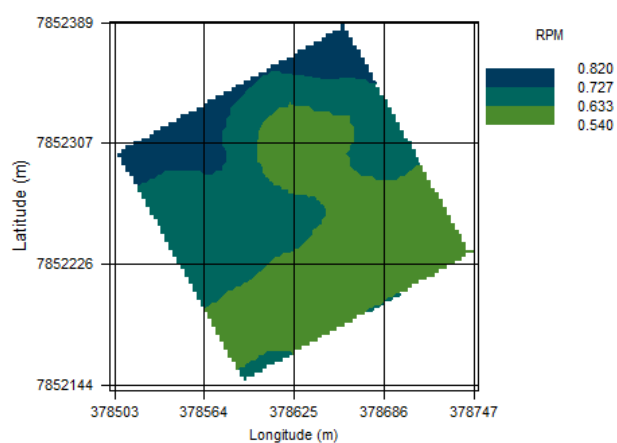
(h) Densidade de partícula



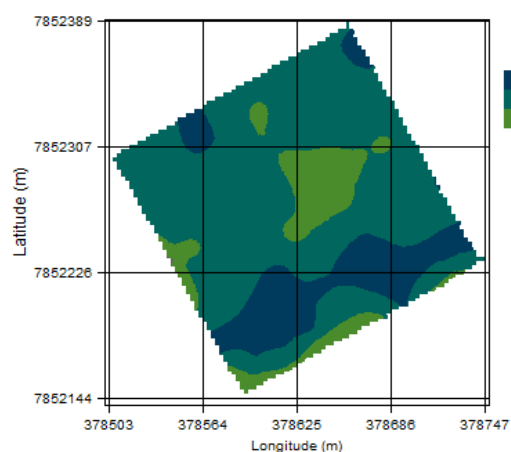
(i) RP de 10 a 20 cm



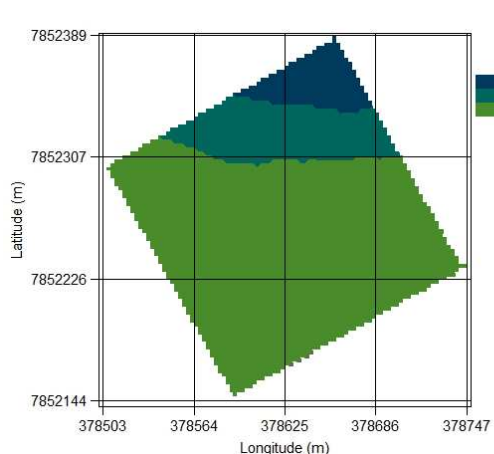
(j) RPM



(k) Umidade volumétrica



(l) DTA



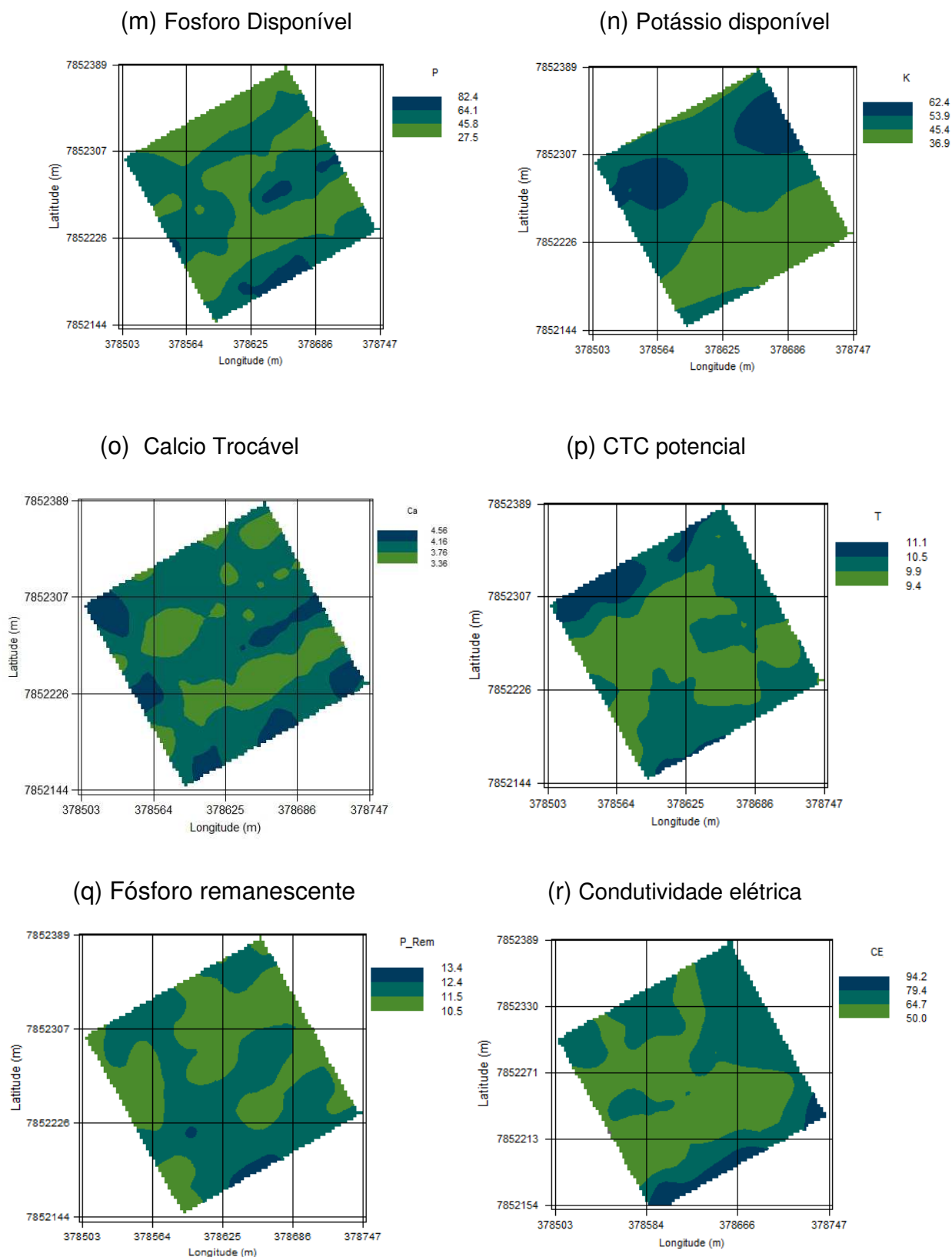


Figura 8. Mapas de krigagem simples para os índices fenológicos da cenoura e os atributos físico-químicos do solo, em que: (a) produtividade da cenoura ($t\ ha^{-1}$); (b) diâmetro do ombro (mm); (c) diâmetro da ponta (mm); (d) diâmetro do colo (mm); (e) diâmetro do coração (mm); (f) número de folha (adimensional); (g) IAF= índice de área folhar (%); (h) densidade de partícula ($g\ cm^{-3}$); (i) resistência à penetração 10 a 20 cm de profundidade (MPa); (j) resistência à penetração média (MPa); (k) umidade volumétrica (%); (l) Disponibilidade total de água no solo ($mm\ cm^{-1}$ de solo); (m) fósforo disponível, (n)

potássio disponível, (o) cálcio trocável, (p) CTC potencial, em cmolC dm^{-3} , (q) fósforo remanescente, em mg L^{-1} ; (r) condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$).

A implementação dos sistemas de agricultura de precisão implica um ciclo fechado de diversas tarefas. O ponto de partida para esse ciclo é o mapa de produtividade, sendo este o melhor indicativo da variabilidade espacial das lavouras. O mapa de produtividade pode ser a ferramenta de avaliação de todas as regras de manejo adotadas na produção da lavoura; ou seja, permite avaliar se os tratamentos adotados estão gerando o retorno desejado; “O mapa de produtividade materializa a resposta da cultura” (Molin, 2000).

Quando se analisa o mapa de produtividade obtido (Figura 8a), percebe-se que a região norte da lavoura exibiu as maiores produtividades. Pode-se observar adicionalmente que boa parte da área está classificada como de produtividade média, encontrando-se ainda acima da média indicada por Carvalho et al., (2021) para a região de estudo (70 toneladas por hectare). Infere-se que as práticas de manejo (adubação, irrigação ou preparo do solo, por exemplo) foram adequadas às necessidades da cultura. É importante ressaltar que o estudo dos mapas de produtividade, em conjunto com as observações de outro tipo de mapas (índices fenológicos da planta e/ou atributos físico-químicos do solo, por exemplo) são uma ferramenta útil para implementação de uma amostragem direcionada ou delimitação de zonas de manejo. Além disso, são informações importantes para identificação de possíveis falhas acontecidas durante o manejo da lavoura, que podem ser corrigidas pelo produtor nos plantios futuros (Oliveira et al., 2020).

Segundo D’Hooghe et al. (2018) o principal desafio na produção de cenoura, afim de melhorar seu rendimento e valor comercial, é a redução da variabilidade espacial no tamanho das raízes nas lavouras. Os autores supracitados constataram que a variabilidade no diâmetro da cenoura encontra-se diretamente influenciada pela homogeneidade na distribuição das plantas na semeadura. A competição pelos mesmos recursos (luz, água e nutrientes) entre plantas próximas tem grande impacto em seus diâmetros radiculares. Assim, o mapeamento da variabilidade espacial dos componentes produtivos, diâmetro e comprimento da raiz são de extrema importância para o produtor, pois permite avaliar indiretamente a uniformidade de distribuição de sementes pela semeadora.

Segundo observado na Figura 8b, os maiores diâmetros de raiz (DR1) foram encontrados na região sul e norte da lavoura; a região central exibiu diâmetros classificados como médios e baixos. Não obstante, observando os valores mínimos e máximos para o DR1 apresentados na figura 8b (34,4 a 38,9 mm, respectivamente), é possível constatar uma baixa variação nos tamanhos dos diâmetros encontrados na área de estudo. O anterior permite inferir uma adequada uniformidade de distribuição de sementes pela semeadora. Adicionalmente, infere-se também que não foram apresentados impedimentos físico-químicos que pudessem influenciar no desenvolvimento da raiz, o que pode denotar uma boa preparação do solo e uma adequada fertilização.

Por outro lado, o comprimento de raiz mostrou efeito pepita puro (sem dependência espacial), não sendo possível gerar o mapa para visualização do padrão de distribuição espacial. O anterior pode ser explicado devido à homogeneidade dos comprimentos de cenoura encontrados na área de estudo (refletido no baixo coeficiente de variação, sendo este de 5,53 %). Do mesmo jeito que o apresentado para o diâmetro da raiz (DR1), é possível constatar uma adequada preparação do solo e uma adequada fertilização, o que permitiu um bom desenvolvimento da cultura.

Segundo o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (2004), as raízes são classificadas em classe longa (comprimento entre 17 a 25 cm; diâmetro menor a 5 cm); média (comprimento entre 12 a 17 cm; diâmetro maior a 2,4 cm) e curta (comprimento entre 5 a 12 cm; diâmetro maior a 1 cm). Como foi apresentado na Tabela 6, o valor mínimo e máximo para o comprimento da cenoura foi de 17,24 cm e 22,28 cm, respectivamente; já o diâmetro da raiz apresentou valores entre 3,22 cm e 4,22 cm. Diante disso, as raízes da cenoura foram enquadradas na classe longa no presente trabalho. Segundo Carvalho et al. (2021) o consumidor Brasileiro tem preferência por raízes de cenoura cilíndricas, lisas, com comprimento variando, respectivamente, entre 15 cm a 20 cm e 3 cm a 4 cm. Em consequência, a classe na qual foi enquadrada a cenoura avaliada possui um padrão comercial adequado para o consumidor final brasileiro.

Analisando ainda a Figura 8b, em conjunto com a Figura 8c e 8f, é possível detectar uma correlação entre as maiores contagens do número de folhas (NF) e os maiores diâmetros de raiz (DR1 e DR2), na região sul da lavoura. O número de folhas e área foliar são algumas das características que melhor indicam o rendimento potencial da cultura. O engrossamento da raiz é o resultado do cambium secundário,

cuja iniciação é influenciada pela contribuição de assimilados e reguladores de crescimento das folhas (Acosta-Motos et al., 2021). Sendo assim, uma melhora nos atributos número de folhas e área foliar vem sendo um pré-requisito para um aumento na produtividade da cultura.

A principal limitação física encontrada no crescimento de raízes é uma forte resistência mecânica. Uma compactação severa nas camadas iniciais do solo pode levar a raízes deformadas, além de um maior número de raízes cônicas, podendo reduzir os rendimentos totais em cerca de 20%. O alongamento da raiz pode ser substancialmente restringido em valores de resistência à penetração próximos a 2 MPa e porosidade total abaixo de 50% (Bengough et al., 2011; Hodge et al., 2009; Johansen et al., 2015). Observando o mapa 8j pode ser verificado um padrão de correlação na região sul da área, em que foram encontrados os maiores diâmetros de raiz e menor resistência à penetração média (de 0,00 cm a 40,00 cm), que apresentou uma variação de 0,540 a 0,820 MPa. É importante salientar que os níveis de compactação encontrados na área de estudo foram inferiores aos limites máximos reportados para o estabelecimento da cultura de cenoura. Diante do anterior, a resistência à penetração poderia ter influenciado, mas não restringido, a produtividade da cultura.

A disponibilidade total de água no solo (DTA) variou de 0,560 a 0,740 mm cm⁻¹, sendo que a maior faixa ficou entre os valores 0,560 a 0,620 mm cm⁻¹. O anterior devido à baixa heterogeneidade encontrada nos parâmetros que determinam a DTA do solo, sendo estes a umidade em capacidade de campo (U_{cc}), umidade em ponto de murcha permanente (U_{PMP}) e densidade do solo (d_s), os quais apresentaram coeficiente de variação de 3,00; 1,46 e 3,06 %; respectivamente. Já para densidade de partícula (d_p) prevaleceram os valores entre 2,77 a 2,88 g cm⁻³. Valores similares foram reportados por Pinto et al. (2019) no estudo dos atributos físicos de um latossolo sob diferentes práticas de manejo. Segundo os autores supracitados, a densidade de partícula é um atributo muito estável no solo, cuja magnitude depende exclusivamente da composição das partículas sólidas, particularmente das proporções relativas as frações orgânicas e mineral. Isso explica a baixa variação deste atributo na área.

Os valores de DTA reportados para os solos de textura argilosa estão na faixa de 2,0 a 2,5 mm cm⁻¹ de solo (Bernardo et al., 2019). Mesmo assim, os autores anteriormente supracitados ressaltaram que alguns solos de textura fina bem estruturados possuem características de solos de textura meio-grossa, com valores

de DTA muito menores. A coleta de amostras de solo para análise dos atributos físicos foi feita no canteiro, na camada 0-20 cm, na qual foi percebido uma baixa resistência à penetração e um solo bem estruturado, devido à preparação prévia dos canteiros. Os resultados podem explicar os valores baixos encontrados para a d_s (média de $0,86 \text{ g cm}^{-3}$) e DTA (média de $0,61 \text{ mm cm}^{-1}$ de solo).

As práticas de fertilização na lavoura foram efetuadas de forma homogênea, aplicando a mesma quantidade de fertilizante em toda a área do pivô. Não obstante, os mapas gerados para os atributos químicos (Figura 8m, 8n, 8o, 8p, 8q, 8r para o P, K, Ca, T, P_rem e CE, respectivamente) indicaram uma grande variabilidade nas amostras, constatada anteriormente na análise do CV, sendo maior para os atributos de P, K e CE. Diante disso, percebe-se que a análise dos mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo é um aspecto importante a levar em consideração na aplicação de fertilizantes, já que a área da lavoura pode ter regiões com requerimentos maiores do que outras. Assim, os produtores podem fazer amostragem direcionada em regiões que apresentaram os maiores e menores valores, a fim de criar zonas de manejo que permitam um gerenciamento de aplicação de fertilizante a taxa variada.

Analisando a Figura 8m, observou-se que o fósforo exibiu padrão de distribuição variado na área de estudo. Evidencia-se que as regiões com menores valores de P disponível estão seguindo a direção dos canteiros, principalmente na região centro e norte da área. Sendo o P um elemento de baixa mobilidade, infere-se que o padrão de variabilidade encontrado seja produto das práticas de adubação realizadas. Vale ressaltar que, segundo a classificação proposta por Ribeiro et al. (1999), os níveis de fósforo disponível encontrados na região de estudo para os valores de fósforo remanescente apresentados (Figura 8q), caíram dentro da classe de disponibilidade muito boa.

O fósforo é um nutriente importante na estimulação e enraizamento, além da fixação e estabilidade das plantas, contribuindo assim para uma maior produtividade. É indispensável no estabelecimento da cultura, já que participa de diversos processos metabólicos como respiração, fotossíntese, divisão celular, armazenamento e transferência de energia, além de estar diretamente relacionado na absorção de outros nutrientes. Um rápido desenvolvimento radicular implica uma maior área foliar no ciclo inicial da cultura, que favorece a interceptação solar e produção de fotoassimilados (Pelá et al., 2018; Da Silva et al., 2021). Diante dos resultados, e

observando o padrão de variabilidade espacial do P em contraste com a produtividade encontrada na lavoura, os menores níveis encontrados foram suficientes para o crescimento e desenvolvimento da cenoura, inferindo-se uma possível economia do fertilizante na próxima safra, nas regiões que apresentaram os maiores valores de P.

O potássio (K) cumpre com a função de regulação do manejo da água e manutenção do turgor celular das plantas. Participa da síntese de proteínas e açúcares simples e complexos, além do transporte de íons nitrato (NO_3^-) e fosfato (PO_4^{3-}), assim como assimilados; é responsável por funções regulatórias nas plantas (Szelag-Sikora et al., 2019). A distribuição espacial do K foi mostrada na Figura 8n. Os valores de K do solo de toda a área variaram de 36,9 a 62,4 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, apresentando os menores valores na região sul da lavoura. É possível observar que os maiores diâmetros de raiz e número de folhas foram encontrados na mesma região. O anterior pode ser um índice que o teor de potássio mínimo encontrado na área não foi um fator restritivo para o desenvolvimento destes índices fenológicos de produção. Da mesma forma que para o P, é possível avaliar uma possível economia no uso deste fertilizante nas regiões com os maiores teores amostrados.

A deterioração da qualidade da água é um dos maiores problemas ambientais globais. A agricultura é considerada a maior fonte difusa de poluição de água, devido especialmente ao uso indiscriminado de fertilizantes. Aplicações repetidas e prolongadas de fertilizantes causam um acúmulo de nutrientes no solo que, por lixiviação e escoamento superficial, penetram nos lençóis freáticos e nos recursos hídricos superficiais (Abd-Elaty et al., 2020; Khan et al., 2017). Diante disso, uma diminuição nos excedentes de fertilizantes não só representará uma economia para o produtor, mas contribuirá também na diminuição da lixiviação, evitando contaminação de águas subterrâneas e superficiais.

O Ca apresentou uma distribuição variada na lavoura, com valores entre 3,36 a 4,56 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Segundo os tratos culturais apresentados na tabela 1, antes da semeadura, foi feita uma adubação com 3-15-15 e MC 60 YOORIN MASTER 1 SI, cuja composição inclui 10,59% e 18% de Ca, respectivamente. Espera-se que a variabilidade encontrada no solo seja produto da adubação realizada no começo da safra.

Já os atributos T e CE indicaram os menores valores em grande parte da área de estudo, variando de 9,4 a 11,1 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o T; e 50,0 a 94,2 uS cm^{-1} para a CE (Figura 5q e 5r).

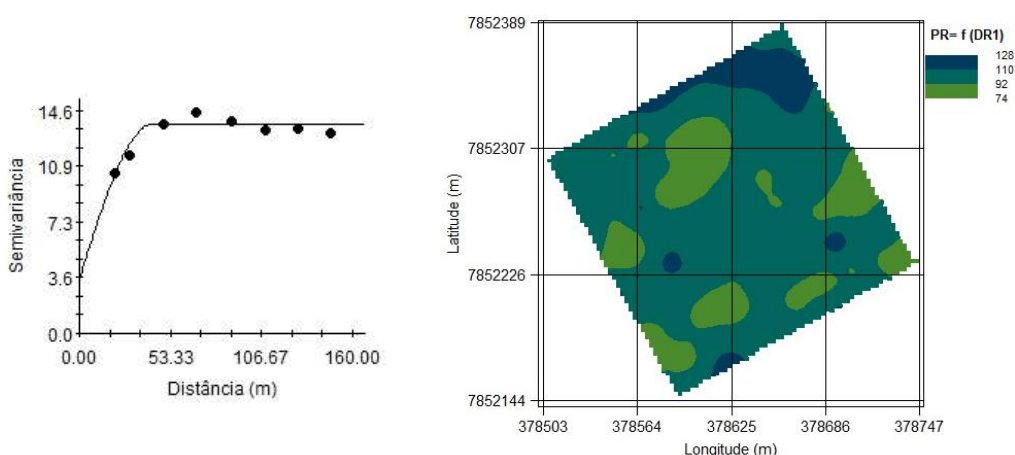
Em relação à cokrigagem (Tabela 8 e Figura 9), verificou-se uma correlação espacial significativa e positiva para a produtividade da cenoura em razão dos atributos da planta: diâmetro maior da raiz ($PR = f(DR1)$), diâmetro menor da raiz ($PR = f(DR2)$); em razão do atributo físico do solo: disponibilidade total de água no solo ($PR = f(DTA)$); e em razão do atributo químico CTC potencial a pH 7 ($PR = f(T)$). Foi observada uma moderada correlação espacial para $PR = f(DR1)$ e forte para $PR = f(DR2)$, $PR = f(DTA)$ e $PR = f(T)$, com avaliador de dependência espacial de 73,8; 84,3; 90,6 e 99,9; respectivamente.

Tabela 8. Parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados para a produtividade em razão dos atributos da planta e atributos físico-químicos do solo

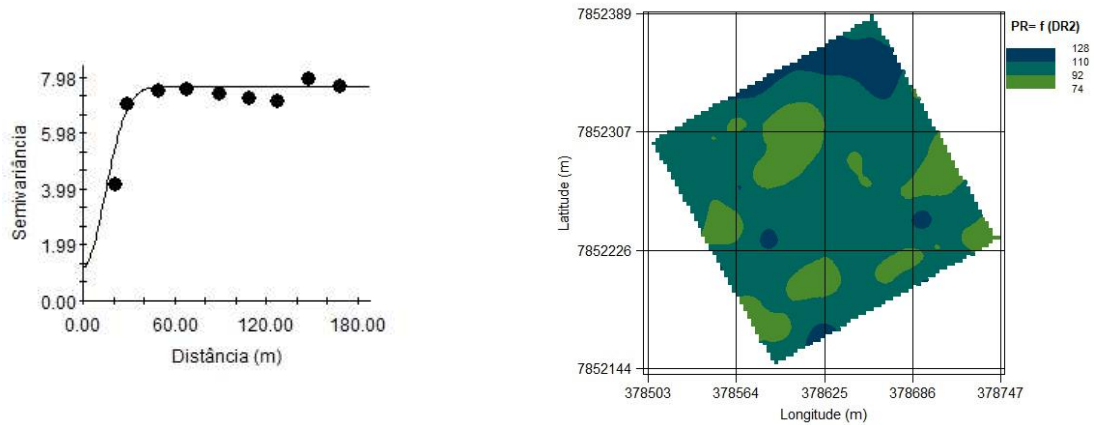
Atributo ⁽¹⁾	Modelo ⁽²⁾	Efeito pepita (C_0)	Pata-mar (C_1)	Alcance (m)	r^2	SQR ⁽³⁾	ADE ⁽⁴⁾	
							(%)	Classe
$PR = f(DR1)$	ESF	3,58	13,68	43,1	0,87	1,58	73,8	Moderada
$PR = f(DR2)$	GAUSS	1,20	7,65	35,0	0,91	1,72	84,3	Forte
$PR = f(DTA)$	ESF	0,042	0,45	193,0	0,85	2,80E-02	90,6	Forte
$PR = f(T)$	ESF	0,001	1,60	161,5	0,82	0,548	99,9	Forte

⁽¹⁾ PR: Produtividade da cenoura ($t\ ha^{-1}$); **Atributos da planta:** DR1: diâmetro do ombro (mm); DR2: diâmetro da ponta (mm); **Atributos físicos do solo:** DTA: disponibilidade total de água no solo ($mm\ cm^{-1}$ de solo); **Atributos químicos do solo:** T: CTC potencial, em $cmol_c\ dm^{-3}$, ⁽²⁾ ESF: esférico; GAU: gaussiano; ⁽³⁾ Soma de quadrado de resíduos; ⁽⁴⁾ Avaliador da dependência espacial.

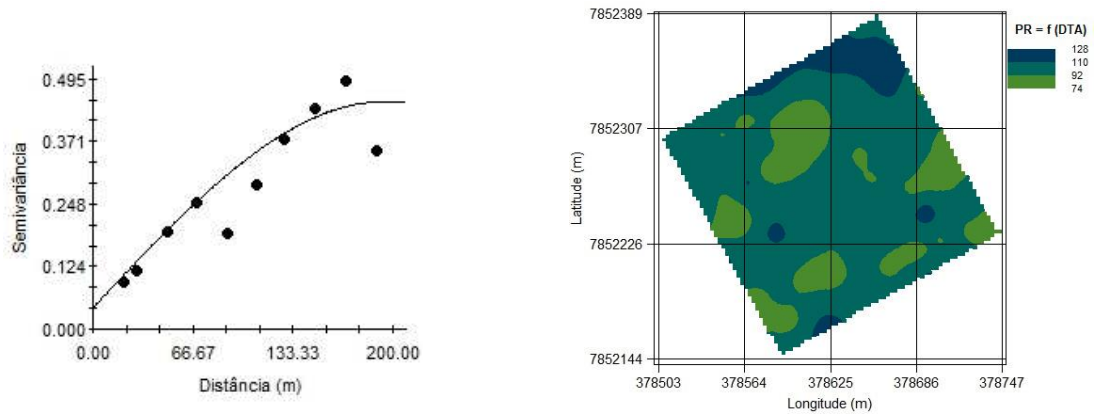
(a) Produtividade = f (diâmetro do ombro)



(b) Produtividade = f (diâmetro da ponta)



(c) Produtividade = f (disponibilidade total de água no solo)



(d) Produtividade = f (CTC potencial)

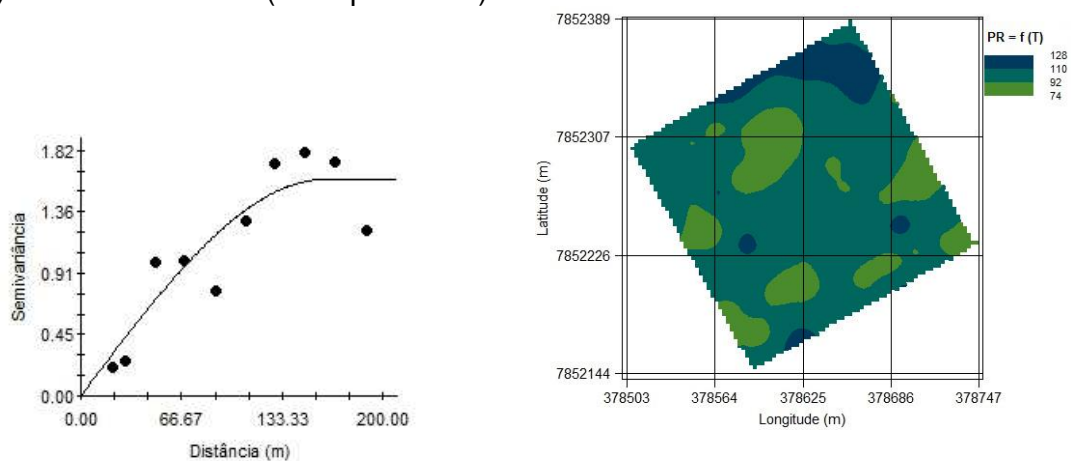


Figura 9. Semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem da produtividade da cenoura em função do (a) diâmetro do ombro, (b) diâmetro da ponta, (c) disponibilidade total de água no solo e (d) CTC potencial.

Os valores do coeficiente de determinação espacial r^2 para $PR=f(DR1)$, $PR=f(DR2)$, $PR=f(DTA)$ e $PR=f(T)$; foram de 0,87; 0,91; 0,85 e 0,82; respectivamente. Assim, pode se evidenciar que, espacialmente, a produtividade da cenoura nas condições de estudo pode ser estimada a partir da krigagem dos atributos da planta DR1 e DR2, dos atributos físicos DTA e do atributo químico do solo T, com uma probabilidade acima de 80%.

4.4 Rede de Correlações e Análise de trilha

As Figuras 10 e 11 apresentam a rede de correlações e análise de trilha, respectivamente, entre as variáveis morfológicas, irrigação e produtividade da cenoura. Mediante a rede de correlações e análise de trilha é possível evidenciar aquelas variáveis que tiveram efeitos significativos diretos positivos e negativos, influenciando na variável primária, sendo estes: massa fresca da raiz (MFR), comprimento da raiz (CR), diâmetro do ombro (DR1), diâmetro da ponta (DR2), diâmetro médio (DRM), diâmetro do coleto (DC), massa fresca da raiz (MFF), comprimento da folha (CF), número de folhas (NF), massa seca da raiz (MSR), massa seca da folha (MSF), e diâmetro do coração (DCR) sob efeito da variável principal, PR.

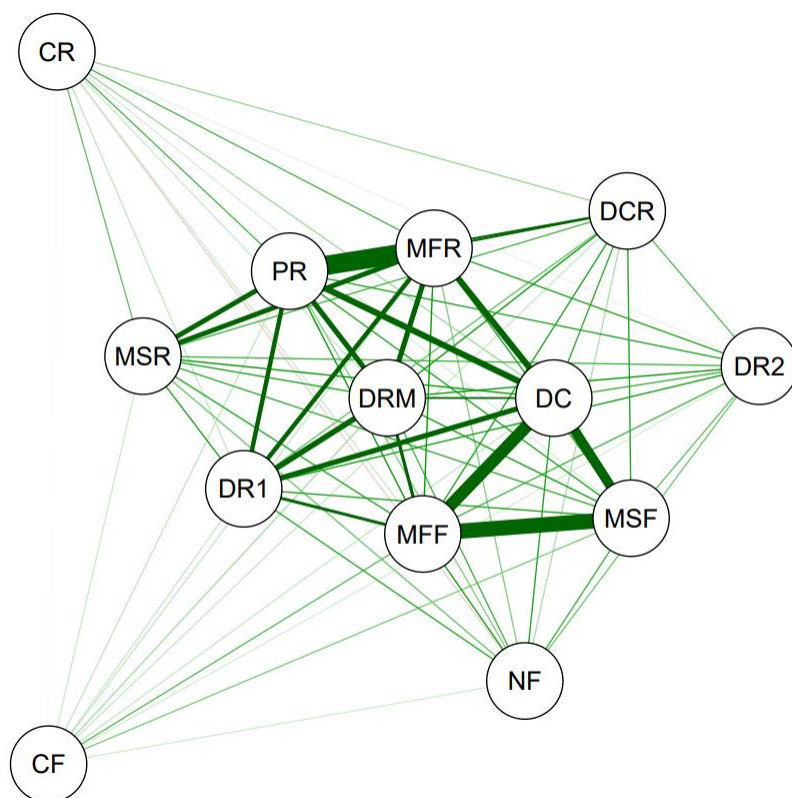


Figura 10. Rede de correlações da PR: produtividade da cenoura Natuna com os seus componentes primários, MFR: massa fresca de raiz; CR: comprimento de raiz; DR1: diâmetro do ombro; DR2: diâmetro da ponta; DRM: diâmetro médio; DC: diâmetro do colo; DCR: diâmetro do coração; MFF: massa fresca de folha; CF: comprimento de folha; NF: número de folha; MSR: massa seca de raiz e MSF: massa seca de folha.

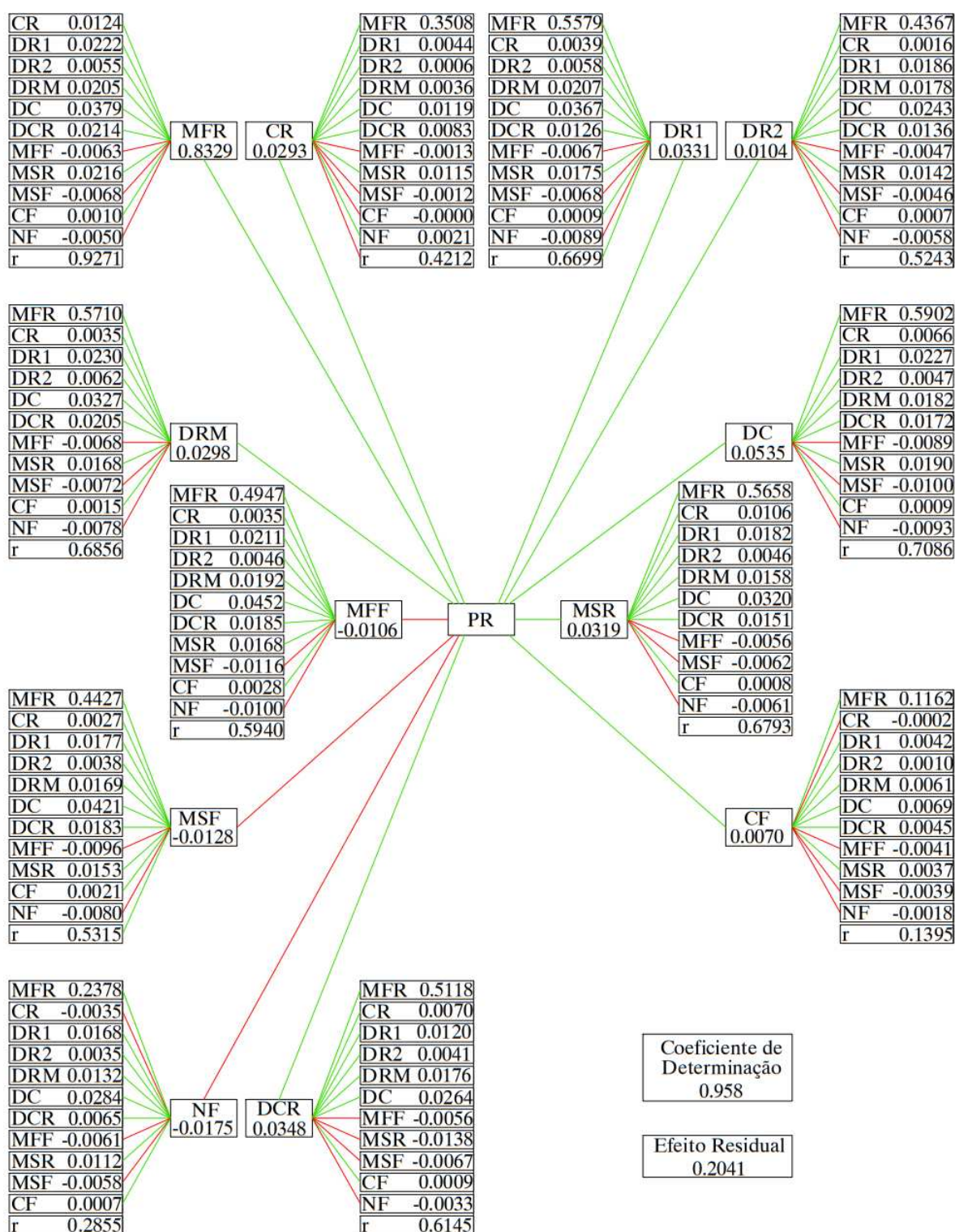


Figura 11. Análise de trilha entre os traços morfológicos produtividade da cenoura Natuna (PR), com os seus componentes primários; MFR: massa fresca de raiz; CR: comprimento de raiz; DR1: diâmetro do ombro; DR2: diâmetro da ponta; DRM: diâmetro médio; DC: diâmetro do colo; MFF: massa fresca de folha; CF: comprimento de folha; NF: número de folha; MSR: massa seca de raiz; MSF: massa seca de folha e DCR: diâmetro do coração.

Analisando a Figura 10 foi possível evidenciar as variáveis que foram significativamente correlacionadas com a produtividade, na qual a espessura e proximidade entre os traços é proporcional a sua correlação. Assim, observou-se que a produtividade se correlacionou positiva e significativamente com a massa da raiz, o diâmetro do coleto, o diâmetro médio, diâmetro do ombro da raiz e o diâmetro do coração, com coeficientes de correlação de 0,99; 0,71; 0,67; 0,69 e 0,62; respectivamente; sendo esses caracteres os componentes principais que contribuem para a produtividade da cultura de cenoura. Resultados similares foram reportados por Singh et al. (2019), no estudo da variabilidade genética e associação de caracteres em cenoura europeia. Os autores indicaram correlação positiva e significativa do rendimento com a massa da raiz, comprimento da raiz e o diâmetro do coleto. Kumar et al. (2011) reportaram que os componentes para melhor previsão do rendimento da raiz de cenoura são espessura do ombro, diâmetro do coleto e peso da raiz. Por outro lado, foi observada uma correlação importante do diâmetro do coleto com a massa fresca e seca da folha, o diâmetro do ombro e diâmetro médio da raiz, com coeficientes de 0,84; 0,79; 0,69 e 0,61, respectivamente.

Seguindo o critério de classificação proposto por Montgomery e Peck (1981) para interpretação da multicolinearidade de acordo com o número de condição, a matriz de correlações de Pearson obtida apresentou multicolinearidade fraca.

A partir da análise de trilha apresentada na Figura 11, foi possível evidenciar que as variáveis que têm maior influência direta na produtividade da cenoura foram a massa fresca da raiz (MFR), com coeficiente de correlação significativa de 0,8329; e em menor magnitude o diâmetro do colo (0,0535), diâmetro do coração (0,0348), diâmetro do ombro (0,0331), diâmetro médio da raiz (0,0298), comprimento da raiz (0,0298), diâmetro da ponta (0,0104) e o comprimento da folha (0,0070). Por outro lado, as variáveis número de folhas, massa fresca da folha e massa seca da folha, apresentaram efeito direto negativo na produtividade (-0,0175; -0,0106; -0,0128; respectivamente). Não obstante, o efeito foi não significativo, o que pode ser explicado devido à pouca variação dessas variáveis dentro da área.

O efeito indireto positivo da massa fresca da raiz foi encontrado na produtividade da cenoura via comprimento da raiz (0,0124), diâmetro da copa (0,0222), diâmetro da ponta (0,0055), diâmetro médio da raiz (0,0205), diâmetro do coleto (0,0379), diâmetro do coração (0,0214), massa seca da raiz (0,0216) e o comprimento da folha (0,0010); enquanto o comprimento da raiz apresentou efeito

indireto positivo via massa fresca e seca da raiz (0,3508 e 0,0115, respectivamente), os diâmetros do ombro, da ponta e médio da raiz, diâmetro do colo e coração (0,3508; 0,0044; 0,0006; 0,0036; 0,0119 e 0,0083; respectivamente) e o número de folhas (0,0021).

O diâmetro do colo mostrou efeitos indiretos positivos na produtividade da cenoura através da massa fresca da raiz (0,5902), comprimento da raiz (0,0066), os diâmetros do ombro (0,0227), ponta (0,0047) e médio da raiz (0,0182), o diâmetro do coração (0,0172), a massa seca da raiz (0,142) e o comprimento da folha (0,0009). O diâmetro do ombro também contribuiu positivamente para a produtividade indiretamente via massa fresca da raiz (0,5479), comprimento da raiz (0,0039), diâmetro da ponta (0,0058), diâmetro médio (0,0207), diâmetro do coleto (0,0367), diâmetro do coração (0,0126), massa seca da raiz (0,0175), comprimento da folha (0,0009) e irrigação (0,0015). Já o diâmetro do coração contribuiu indiretamente para a produtividade via massa fresca da raiz (0,5118), comprimento da raiz (0,0070), diâmetro da raiz (0,0120), diâmetro da ponta (0,0041), diâmetro médio da raiz (0,0176), diâmetro do coleto (0,0264) e comprimento da folha (0,0009). Os altos efeitos positivos diretos da massa da raiz, diâmetro do coleto, seguido do diâmetro do ombro e o diâmetro do coração com a produtividade da cenoura, indicaram a importância dessas características para a seleção direta de uma variedade de cenoura ou em processos de melhoramento.

No presente estudo foi obtido um alto coeficiente de determinação igual a 0,958; indicando que as variações da variável principal (PR) são explicadas em grande parte pelas variáveis avaliadas. Adicionalmente, a variação inexplicável na análise de trilha foi de 0,2041.

5 CONCLUSÕES

A cenoura apresentou alta produtividade (99,74 t ha⁻¹), sendo superior à média reportada para a região de estudo. A produtividade da cultura indicou um coeficiente de variação médio, enquanto os atributos da planta e do solo apresentaram coeficientes de variação de baixo a muito alto.

Os atributos da planta: diâmetro maior, diâmetro menor, diâmetro do colo, diâmetro do coração, número de folhas, índice de área folhar; os atributos físicos do solo: densidade de partícula, resistência à penetração na camada de 10 a 20 cm e

resistência à penetração média, umidade volumétrica e disponibilidade total de água no solo; e os atributos químicos do solo: fósforo disponível, potássio disponível, cálcio trocável, CTC potencial, fósforo remanescente e condutividade elétrica apresentaram dependência espacial variando de moderada a forte.

As variáveis dependentes que apresentaram os menores alcances foram o índice de área foliar (59 m) entre os atributos da planta; a densidade de partícula (40 m) entre os atributos físicos do solo; e o Ca (41,70 m) entre os atributos químicos do solo.

Entre os atributos avaliados, o diâmetro maior de raiz, diâmetro menor, resistência a penetração na camada de 10 a 20 cm, disponibilidade total de água no solo e a CTC potencial a pH 7 foram os melhores indicadores para estimar a variabilidade espacial da produtividade de cenoura irrigada por pivô central no município de Campos Altos.

Mediante a análise de trilha, constatou-se que a seleção com base nos componentes primários massa de raiz, diâmetro do coleto, seguidos do diâmetro do ombro e diâmetro do coração pode melhorar o rendimento e a produtividade da cenoura Natuna.

6 RECOMENDAÇÕES

Para próximos estudos, é recomendável avaliar uma área de abrangência maior do pivô central, mantendo uma distância entre pontos de amostragem adequado, segundo os alcances mínimos encontrados na presente pesquisa para as variáveis em estudo. Adicionalmente, é recomendável avaliar as lâminas de irrigação aplicadas ao longo do ciclo da cenoura, a fim de caracterizar a influência da irrigação na produtividade da cultura.

Visando melhoria da produtividade da cultura de cenoura na área avaliada, é recomendável fazer uma amostragem direcionada ao longo da área de abrangência do pivô central, que permita estabelecer zonas de manejo para aplicação de fertilizante a taxa variada. O anterior devido às variações encontradas nos atributos químicos do solo que permitem inferir uma possível economia nas quantidades de fertilizantes a serem aplicadas no solo.

7 REFERÊNCIAS

- Abd-Elaty, I., Pugliese, L., Zelenakova, M., Mesaros, P., & Shinawi, A. El. (2020). Simulation-based solutions reducing soil and groundwater contamination from fertilizers in arid and semi-arid regions: Case study the eastern Nile delta, Egypt. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(24), 1–18. doi: 10.3390/ijerph17249373
- Acosta-Motos, J. R., Díaz-Vivancos, P., Becerra-Gutiérrez, V., Cortés, J. A. H., & Barba-Espín, G. (2021). Comparative characterization of eastern carrot accessions for some main agricultural traits. *Agronomy*, *11*(12). doi: 10.3390/agronomy11122460
- Agbede, T. M., Adekiya, A. O., & Eifediyi, E. K. (2017). Impact of Poultry Manure and NPK Fertilizer On Soil Physical Properties and Growth and Yield of Carrot. *Journal of Horticultural Research*, *25*(1), 81–88. doi: 10.1515/johr-2017-0009
- Almeida, Brivaldo Gomes, Viana, J. H. M., Teixeira, W. G., & Donagemma, G. K. (2017). Densidade do Solo. In P. C. Teixeira, G. K. Donagemma, A. Fontana, & W. G. Teixeira (Eds.), *Manual de métodos de análise de solo* (3rd ed., pp. 65–75). Brasília, DF: Embrapa. Retrieved from <https://www.embrapa.br>
- Almeida, Brivaldo Gomes de, Freitas, P. L., Teixeira, W. G., Viana, J. H. M., & Donagemma, G. K. (2017). Porosidade. In P. C. Teixeira, G. K. Donagemma, A. Fontana, & W. G. Teixeira (Eds.), *Manual de métodos de análise de solo* (3rd ed., pp. 82–94). Brasília, DF: Embrapa. Retrieved from <https://www.embrapa.br>
- Andreomar, J., Isidoro, C., Volmir, S., Pedro, J., & Branco, P. (2001). Análise De Trilha Como Critério De Seleção Indireta Para Rendimento De Grãos Em Feijão. *Current Agricultural Science and Technology*, *7*(1), 29–32. doi: 10.18539/cast.v7i1.370
- Aquino, R. F. B. A., Assunção, N. S., Aquino, L. A., de Aquino, P. M., de Oliveira, G. A., & de Carvalho, A. M. X. (2015). Nutrient demand by the carrot crop is influenced by the cultivar. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, *39*(2), 541–552. doi: 10.1590/01000683RBCS20140591
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data* *2018* *5*:1, *5*(1), 1–12. doi: 10.1038/sdata.2018.214
- Behera, S. K., Mathur, R. K., Shukla, A. K., Suresh, K., & Prakash, C. (2018). Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India. *Catena*, *165*(June 2017), 251–259. doi: 10.1016/j.catena.2018.02.008
- Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, *62*(1), 59–68. doi: 10.1093/JXB/ERQ350
- Bernardo, S., Mantovani, E. C., da Silva, D. D., & Soares, A. A. (2019). *Manual de irrigação* (9th ed.). Viçosa, Minas Gerais: Editora UFV.

- Bhering, L. . (2017). A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 17, 187–190.
- Buttafuoco, G., & Lucà, F. (2016). The contribution of geostatistics to precision agriculture. *Annals of Agricultural & Crop Sciences The Contribution of Geostatistics to Precision Agriculture*, 1(November), 1–2.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501–1511. doi: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x
- Campanhola, C., Barbosa, M. M. T. L., Lima, H. C. de, Chianca, G. K., Martins, J. M. de A., Torres, R., & Gianni, S. (2004). Manual de segurança e qualidade para a cultura da cenoura. In Embrapa. Retrieved from <http://atividaderural.com.br/artigos/5183ef16aef7d.pdf>
- Carvalho, A. D. F. de, Silva, G. O. da, Ragassi, C. F., Pereira, G. E., Junior, V. L., Lopes, C. A., Pinheiro, J. B., Reis, A., & Pilon, L. (2021). Sistemas de Produção - Cenoura. *Embrapa Hortaliças*, 74. Retrieved from <https://www.embrapa.br/en/hortaliças/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1135838/cenoura-daucus-carota-l>
- Celso, E. (2015). *Análise espacial de superfícies*. January.
- Cruz, C. D. (2013). GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 35(3), 271–276. doi: 10.4025/actasciagron.v35i3.21251
- D'Hooghe, P., Diaz, D., Brunel-Muguet, S., Davy, M., Vial, F., Dubois, J., & Kauffmann, F. (2018). Spatial variation of root yield within cultivated carrot fields is strongly impacted by plant spacing. In *Scientia Horticulturae* (Vol. 241, pp. 29–40). doi: 10.1016/j.scienta.2018.06.072
- Dey, P., Karwariya, S., & Bhogal, N. (2017). Spatial Variability Analysis of Soil Properties Using Geospatial Technique in Katni District of Madhya Pradesh, India. *International Journal of Plant & Soil Science*, 17(3), 1–13. doi: 10.9734/IJPSS/2017/34219
- Dezordi, L. R., Aquino, L. A. de, Aquino, R. F. B. de A., Clemente, J. M., & Assunção, N. S. (2016). Diagnostic Methods to Assess the Nutritional Status of the Carrot Crop. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 40. doi: 10.1590/18069657rbcS20140813
- Dezordi, L. R., Aquino, L. A. De, Novais, R. F., De Aquino, P. M., & dos Santos, L. P. D. (2015). Nutrient recommendation model for carrot crop—Ferticalc carrot. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 39(6), 1714–1722. doi: 10.1590/01000683RBCS20150065
- Dezordi, L. R., Clemente, J. M., Oliveira, T. F., Gentil, T. G., & de Aquino, L. A. (2015). Nutrient demand of the carrot crop. *African Journal of Agricultural Research*, 10(35), 3533–3542. doi: 10.5897/ajar2015.9849

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. (1997). *Manual de métodos de análise de solo*. 212.

Filho, G. R., Carvalho, M. D. P. E., Montanari, R., Da Silva, M. J., Siqueira, M. G., & Zambianco, C. (2011). Variabilidade espacial de propriedades dendrométricas do eucalipto e de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Spatial variability of dendrometric properties of eucalyptus and physical attributes of a Rhodic Eutrudox. *Bragantia*, 70(2), 439–446.

Guimarães, C., Silva, F., Xavier, W., Costa, C., Filho, R., & Santos, I. (2018). Moisture Behavior to the Spatial Variability of Physical Attributes in Different Soil Management. *Journal of Experimental Agriculture International*, 25(1), 1–8. doi: 10.9734/jeai/2018/42726

Hodge, A., Berta, G., Doussan, C., Merchan, F., & Crespi, M. (2009). Plant root growth, architecture and function. In *Plant and Soil* (Vol. 321, Issues 1–2). doi: 10.1007/s11104-009-9929-9

Johansen, T. J., Thomsen, M. G., Løes, A.-K., & Riley, H. (2015). Root development in potato and carrot crops – influences of soil compaction. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 65(2), 182–192. doi: 10.1080/09064710.2014.977942

Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., & Alamri, S. A. (2017). Fertilizers and their contaminants in soils, surface and groundwater. In *Encyclopedia of the Anthropocene* (Vols. 1–5). Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-0-12-809665-9.09888-8

Kingsley, J., Lawani, S. O., Esther, A. O., Ndiye, K. M., Sunday, O. J., & Penížek, V. (2019). Predictive Mapping of Soil Properties for Precision Agriculture Using Geographic Information System (GIS) Based Geostatistics Models. *Modern Applied Science*, 13(10), 60. doi: 10.5539/mas.v13n10p60

Kumar, R., Vashisht, P., Gupta, R. K., Singh, M., & Kaushal, S. (2011). Characterization of european carrot genotypes through principal components and regression analyses. *International Journal of Vegetable Science*, 17(1), 3–12. doi: 10.1080/19315260.2010.486021

Laviola, B., Teodoro, P. E., Rodrigues, E. V., Costa, R. D., Dourado, R. M., Teixeira da Costa, L., & Falção, R. (2016). *Análise de trilha para produtividade de grãos em pinhão-mansão*.

Liaghat, S., & Balasundram, S. . (2010). A Review: The Role of Remote Sensing in Precision Agriculture. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 5(1), 50–55. doi: 10.3844/ajabssp.2010.50.55

Lopes, B. G., Faria, G. A., Maltoni, K. L., Rocha, P. S., Peixoto, A. P. B., de Oliveira, T. A., da Fonseca, A. D., Felizardo, L. M., & Costa, C. A. G. (2021). Classification of the coefficient of variation for experiments with eucalyptus seedlings in greenhouse. *Revista Ciência Agronômica*, 52(4), 1–14. doi: 10.5935/1806-6690.20210050

Lundgren, W. J. C., Silva, J. A. A. da, & Ferreira, R. L. C. (2015). Estimação de volume de madeira de Eucalipto por cokrigagem, Krigagem e regressão. *CERNE*, 21(2), 243–

250. doi: 10.1590/01047760201521021532

Marouelli, W. A., Oliveira, R. A., & Silva, W. L. C. (2007). Irrigação da Cultura da Cenoura. *Circular Técnica - Embrapa*, 48, 1–14.

Molin, J. P. (2000). Geração e interpretação de mapas de produtividade para agricultura de precisão. In A. Borém, M. P. Giúdice, D. M. Queiroz, E. C. Mantovani, L. R. Ferreira, F. X. R. Valle, & R. L. Gomide (Eds.), *Agricultura de Precisão* (pp. 237–258). Universidade Federal de Viçosa.

Montanari, R., Panachuki, E., Henrique Lovera, L., Rodrigues Correa, A., Souza Oliveira, I., Andrade Queiroz, H., & Kerlyane Tomaz, P. (2015). *Variabilidade Espacial da Produtividade de Sorgo e de Atributos do Solo na Região do Ecótono Cerrado-Pantanal, MS*. 39, 385–396. doi: 10.1590/01000683rbc20140215

Montazar, A., Geisseler, D., & Cahn, M. (2021). Spatial variability of nitrogen uptake and net removal and actual evapotranspiration in the california desert carrot production system. *Agriculture (Switzerland)*, 11(8). doi: 10.3390/agriculture11080752

Montgomery, D. ., & Peck, E. . (1981). *Introduction to linear regression analysis*. New York: John Wiley e Sons.

Najafian, A., Dayani, M., Motaghian, H. R., & Nadian, H. (2012). Geostatistical Assessment of the Spatial Distribution of Some Chemical Properties in Calcareous Soils. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(10), 1729–1737. doi: 10.1016/S2095-3119(12)60177-4

Oliveira, J. T., Oliveira, R. A., Oliveira, L. A. A., Teodoro, P., & Montanari, R. (2020). Spatial variability of irrigated garlic (*Allium sativum* L.) production components. *HortScience*, 55(3), 300–303. doi: 10.21273/HORTSCI14409-19

Oliver, M. A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113, 56–69. doi: 10.1016/j.catena.2013.09.006

Oliver, M A. (2010). Geostatistical Applications for Precision Agriculture. In M.A. Oliver (Ed.), *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Dordrecht: Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-90-481-9133-8

Oliver, Margaret A. (2013). Precision agriculture and geostatistics: How to manage agriculture more exactly. *Significance*, 10(2), 17–22. doi: 10.1111/J.1740-9713.2013.00646.X

Onanuga, A. O., Fat, R. W., & Fat, R. M. W. (2021). Growth and Yield of Corn, Carrot and Onion Treated With Rock Phosphate Organic Fertilizer Grown in Standoff Soil Southern Alberta, Canada. *Journal of Agricultural Science*, 13(3), 46. doi: 10.5539/jas.v13n3p46

Orejuela, I. P., González, C. L., Guerra, X. B., Mora, E. C., & Toulkeridis, T. (2021). Geoid undulation modeling through the Cokriging method—A case study of Guayaquil, Ecuador. *Geodesy and Geodynamics*, 12(5), 356–367. doi: 10.1016/J.GEOG.2021.04.004

- Pederson, S. M., & Lind, K. M. (2017). Precision agriculture - from mapping to site-specific application. In S. M. Pederson & K. M. Lind (Eds.), *Precision agriculture: technology and economic perspectives* (pp. 1–21). Springer. doi: 10.1007/978-3-319-68715-5_6
- Pelá, A., Ribeiro, M. A., Bento, R. U., Cirino, L. H. B., & Reis Júnior, R. A. (2018). Enhanced-efficiency phosphorus fertilizer: Promising technology for carrot crop. *Horticultura Brasileira*, *36*(4), 492–497. doi: 10.1590/s0102-053620180411
- Pinto, L. C., Chagas, W. F. T., & Amaral, F. H. C. (2019). Physical attributes of a Dystroferic Red Latosol (Oxisol) under different management systems. *Revista Agrogeoambiental*, *11*(1), 111–119. doi: 10.18406/2316-1817v11n120191198
- Qin, Q., Wang, H., Lei, X., Li, X., Xie, Y., & Zheng, Y. (2020). Spatial variability in the amount of forest litter at the local scale in northeastern China: Kriging and cokriging approaches to interpolation. *Ecology and Evolution*, *10*(2), 778–790. doi: 10.1002/ece3.5934
- Que, F., Hou, X.-L., Wang, G.-L., Xu, Z.-S., Tan, G.-F., Li, T., Wang, Y.-H., Khadr, A., & Xiong, A.-S. (2019). Advances in research on the carrot, an important root vegetable in the Apiaceae family. *Horticulture Research 2019* *6*:1, *6*(1), 1–15. doi: 10.1038/s41438-019-0150-6
- Radočaj, D., Jurišić, M., & Gašparović, M. (2022). The role of remote sensing data and methods in a modern approach to fertilization in precision agriculture. *Remote Sensing*, *14*(3). doi: 10.3390/rs14030778
- Rajpurohit, D. (2018). A review: Food, chemical composition and utilization of carrot (*Daucus carota* L.) pomace. *Article in International Journal of Chemical Sciences*, *6*(3), 2921–2926. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/328450822>
- Reginaldo, L. T. R. T., Lins, H. A., Sousa, M. D. F., Teófilo, T. M. D. S., Mendonça, V., & Silva, D. V. (2021). Weed interference in carrot yield in two localized irrigation systems. *Revista Caatinga*, *34*(1), 119–131. doi: 10.1590/1983-21252021v34n113rc
- Ribeiro, A. C., Guimarães, P. T. G., & Alvarez, V. H. (1999). *Recomendações para o uso de corretivo e fertilizantes em Minas Gerais - 5a aproximação*. Viçosa, Minas Gerais: UFV.
- Santos, H. G. dos, Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C. dos, Oliveira, V. Álvaro de, Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almedida, J. A. de, Araújo Filho, J. C. de, Oliveira, J. B. de, & Cunha, T. J. F. (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos. In Embrapa Solos (3rd ed.). Brasília.
- Shapiro, S. ., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality: Complete samples. *Biometrika*, *52*, 591–611.
- Sharma, A., Jain, A., Gupta, P., & Chowdary, V. (2021). Machine Learning Applications for Precision Agriculture: A Comprehensive Review. *IEEE Access*, *9*, 4843–4873. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048415
- Silva, C. D., Soares, M. E. P., Ferreira, M. H., Cavalcante, A. C. P., de Andrade, G. A.

- V., & de Aquino, L. A. (2020). Dry matter and macronutrient extraction curves of potato varieties in the Alto Paranaíba region, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(3), 176–186. doi: 10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V24N3P176-186
- Silva, J. C., Costa, L. F. F., Santos, D. P., Santos, L. J. S., Silva, C. B., & Santos, M. A. L. (2021). Combination of irrigation and fertilizer increases yield and economic profit in carrot production. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, 25, 807–812.
- Silva, J. N., Neto, F. B., De Lima, J. S. S., Chaves, A. P., Santos, E. C. Dos, & Nunes, R. L. C. (2021). Agro-economic indicators for carrot under green manure in a semi-arid environment. *Revista Caatinga*, 34(2), 257–265. doi: 10.1590/1983-21252021v34n202rc
- Singh, S. R., Ahmed, N., Ranjan, J. K., Srivatava, K. K., Kumar, D., & Yousuf, S. (2019). Assessment of genetic variability, character association, heritability and path analysis in European carrot (*Daucus carota* var. *Sativa*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 89(7), 1140–1144. doi: 10.56093/ijas.v89i7.91660
- Szelag-Sikora, A., Sikora, J., Niemiec, M., Gródek-Szostak, Z., Kapusta-Duch, J., Kuboń, M., Komorowska, M., & Karcz, J. (2019). Impact of integrated and conventional plant production on selected soil parameters in carrot production. *Sustainability (Switzerland)*, 11(20). doi: 10.3390/su11205612
- Teixeira, W. G., & Behring, S. B. (2017). Retenção de Água no Solo Pelos Métodos da Mesa de Tensão e da Câmara de Richards. In P. C. Teixeira, G. K. Donagemma, A. Fontana, & W. G. Teixeira (Eds.), *Manual de Métodos de Análise de Solo* (3rd ed., pp. 34–46). Brasília, DF: Embrapa. Retrieved from <https://www.embrapa.br>
- Viana, J. H. M., Wenceslau, G. T., & Donagemma, G. K. (2017). Densidade de partículas. In P. C. Teixeira, G. K. Donagemma, A. Fontana, & W. G. Teixeira (Eds.), *Manual de métodos de análise de solo* (3rd ed., pp. 76–81). Brasília, DF: Embrapa. Retrieved from <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/194786/1/Pt-5-Cap-1-Micromorfologia-do-solo.pdf>
- Vieira, S. R., Carvalho, J. R. P. de, & González, A. P. (2010). Jack knifing for semivariogram validation. *Bragantia*, 69, 97–105.
- Wei, M. C. F., Maldaner, L. F., Ottoni, P. M. N., & Molin, J. P. (2020). Carrot Yield Mapping: A Precision Agriculture Approach Based on Machine Learning. *Ai*, 1(2), 229–241. doi: 10.3390/ai1020015
- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), 113–132. doi: 10.1016/S0168-1699(02)00096-0
- Zonta, J. H., Bezerra, J. R. C., Pereira, J. R., & Sofiatti, V. (2016). Manejo da irrigação do Algodoeiro. *Embrapa*, 8. Retrieved from www.embrapa.br/algodao