

JOB TEIXEIRA DE OLIVEIRA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E
DE COMPONENTES DE PRODUÇÃO DO ALHO IRRIGADO**

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

Orientador: Rubens Alves de Oliveira

Coorientadores: Rafael Montanari

Fernando França da Cunha

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2019**

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

Oliveira, Job Teixeira de, 1976-

O48e Variabilidade espacial de atributos do solo e de
2019 componentes de produção do alho irrigado / Job Teixeira de
Oliveira. – Viçosa, MG, 2019.
88 f. : il. ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Rubens Alves de Oliveira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Solos - Manejo. 2. Solos - Morfologia. 3. Agricultura de
precisão. 4. *Allium sativum*. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

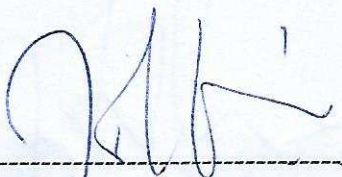
CDD 22. ed. 631.4

JOB TEIXEIRA DE OLIVEIRA

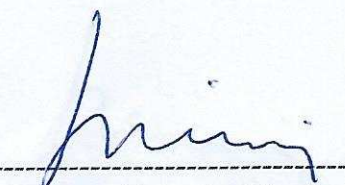
**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E
DE COMPONENTES DE PRODUÇÃO DO ALHO IRRIGADO**

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

APROVADA: 05 de setembro de 2019.



Job Teixeira de Oliveira
Autor



Rubens Alves de Oliveira
Orientador

DEDICO

À minha querida mãe, Jandira Martins Teixeira, que nunca mediu esforços para me educar e sempre me ajudou com seus ensinamentos e sua sabedoria!

AGRADEÇO

a Deus,
por sempre estar ao meu lado e me
ensinar a percorrer os caminhos da vida

OFEREÇO

À minha companheira Isabela da Silva Ribeiro, pelo carinho, calma e compreensão.

Aos meus irmãos Jaime Teixeira de Oliveira e Ibrahim Teixeira de Oliveira, por terem trabalhado em família e auxiliado nos meus estudos. Às minhas queridas filhas Maria Fernanda e Stella.

AGRADECIMENTOS

À UFV/DEA, uma grande escola formadora de profissionais que alavancam o crescimento deste país!

Ao meu orientador, professor Dr. Rubens Alves de Oliveira, pelos valiosos ensinamentos acadêmicos, dedicação, bom humor, críticas e amizade.

Aos coorientadores Dr. Rafael Montanari e Dr. Paulo Teodoro, por suas valiosas amizades, ajudas na compilação dos dados e constante colaboração tanto no mestrado quanto no doutorado.

Ao professor e amigo Dr. Fernando Cunha, pela amizade, confiança, sinceridade extrema e aprendizagens.

Ao Chicão, da Hidráulica e José Antônio, da Área de Irrigação, pela ajuda durante a condução das análises laboratoriais e na coleta dos dados de campo, respectivamente.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFV, que foram indispensáveis para meu crescimento profissional e intelectual.

Aos colegas do CRRH Centro de Referência em Recursos Hídricos, pela oportunidade de ter compartilhado um pouco de nossos caminhos juntos e aos demais colaboradores que contribuíram com meu trabalho e que sempre desejaram meu bem, pois acredito que somos a soma das pessoas com quem convivemos à nossa volta.

Por fim, meu muito obrigado, em especial, ao amigo Lucas Alan, pelo compartilhamento da área experimental, necessária para que eu pudesse desenvolver este trabalho! Que Deus lhe retribua em dobro!

*"E as perguntas continuam
Sempre as mesmas
Quem eu sou?
Da onde venho?
E aonde vou, dá?*

*E todo mundo explica tudo
Como a luz acende
Como um avião pode voar
Ao meu lado um dicionário
Cheio de palavras
Que eu sei que nunca vou usar*

....

*E sendo nuvem passageira
Não me leva nem à beira
Disso tudo
Que eu quero chegar
E fim de papo!"*

Raul Seixas

RESUMO

OLIVEIRA, J. T., D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2019. **Variabilidade espacial de atributos do solo e de componentes de produção do alho irrigado.** Orientador: Rubens Alves de Oliveira. Coorientadores: Rafael Montanari e Fernando França da Cunha.

A cultura do alho tem representativa exploração agrícola, não só pelo valor econômico de sua produção, como também pela grande área de cultivo no Brasil. No ano de 2018, este trabalho foi conduzido em um Latossolo Vermelho Amarelo, tendo sido desenvolvido na Área de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil. O objetivo foi avaliar se a variabilidade espacial do solo e de componentes de produção da planta e a utilização do sistema de manejo de irrigação e fertirrigação com déficit controlado afetam o superbrotamento e a produtividade do alho. As variáveis avaliadas foram produtividade do alho, as variáveis da planta foram massa total, comprimento do pendão floral, comprimento da folha, largura da folha, massa seca, diâmetro do pseudocaule, número de bulbilhos, massa de bulbilhos, diâmetro do bulbo, altura do bulbo, volume do bulbo, raiz, superbrotamento, índice de área foliar, tensão de água na planta e as variáveis do solo foram condutividade elétrica, resistência mecânica à penetração nas profundidades 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 e 0-0,40 m, umidade volumétrica na profundidade de 0-0,20 m e interferência dos componentes externos, irrigação e fertirrigação com nitrogênio com déficit aplicado na formação dos bulbilhos. Os atributos foram amostrados em uma malha de 90 pontos georreferenciados. A análise dos dados foi feita por meio das técnicas estatísticas e da geoestatística e possibilitou constatar que a produtividade tem relação direta com altura e diâmetro do bulbo, massa total da planta, largura da folha e massa de bulbilhos. A porcentagem de superbrotamento tem relação direta com a produtividade. Menores lâminas de água e menores doses de nitrogênio aplicadas na diferenciação dos bulbilhos resultaram em menores incidências de superbrotamento no alho. Os resultados mostraram correlação espacial inversa entre produtividade do alho e condutividade elétrica, resistência à penetração e tensão de água na planta. O superbrotamento do alho possui correlação espacial inversa com a resistência à penetração. Por meio da análise de trilha, verificou-se que os componentes primários massa de bulbilhos e número de bulbilhos, seguidos do diâmetro do bulbo e altura do bulbo, são as variáveis diretamente relacionadas com a produtividade do alho. O comprimento da folha e o superbrotamento mostraram correlação negativa com a produtividade do alho. Este último índice fenológico apresentou correlação negativa com a quantidade de bulbilhos e quantidade de raiz. A irrigação com déficit, aplicada no estágio de

formação dos bulbilhos, apresentou correlação positiva com a produtividade do alho e ligeiramente negativa com massa seca, altura do bulbo e superbrotamento.

Palavras-chave: Manejo do solo. Caracteres morfológicos. Agricultura de precisão. *Allium sativum* L.

ABSTRACT

OLIVEIRA, J. T., D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September, 2019. **Spatial variability of soil attributes and production components of irrigated garlic.** Adviser: Rubens Alves de Oliveira. Co-advisers: Rafael Montanari and Fernando França da Cunha.

The culture of garlic has representative agricultural exploitation, not only for the economic value of its production, but also for the large area of cultivation in Brazil. In the year 2018, this work was conducted in a Latossolo Red Yellow. The work was developed in the area of irrigation and drainage of the Federal University of Viçosa, in Viçosa, Minas Gerais, Brazil. The objective was to evaluate if the spatial variability of plant and soil production components affect the factors of production and superbroke in garlic crops and if the use of the irrigation and fertirrigation management system with controlled deficit affect the productivity and the incidence of garlic bursting. The evaluated variables were garlic yield and plant variables: total mass, floral tassel length, leaf length, leaf width, dry mass, diameter of the pseudocaule, number of bulbs, bulb mass, bulb diameter, bulb height, bulb volume, root, sprouting, leaf area index, plant water tension and soil variables: electrical conductivity, mechanical resistance to penetration at depths 0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30; 0.30-0.40 and 0-0.40 m, volumetric humidity in the 0-0.20 m depth and interference from external components, irrigation and nitrogen fertigation with bulb formation. Attributes sampled in a 90-point georeferenced mesh. The analysis of these data through statistical and geostatistical techniques made it possible to verify that the increase in productivity is directly related to the height and diameter of the bulb, total plant mass, leaf width and bulb mass. The increase in the percentage of overgrazing is directly related to the increase in productivity. Lower water depths and lower nitrogen doses applied in the differentiation of bulbiles imply a lower incidence of garlic burrowing. Results show an inverse spatial correlation between garlic productivity and electrical conductivity, penetration resistance and water stress in the plant. Garlic growth has an inverse spatial correlation with penetration resistance. By means of path analysis, results showed that the primary components of garlic yield, bulb mass, number of bulbs, followed by bulb diameter and bulb height, are the variables that are directly related to garlic productivity. The length of the leaf and sprouting showed a negative correlation with the productivity of the garlic. The latter phenological index showed a negative correlation with the number of bulbiles and root amount. Irrigation with deficit, applied at the bulb formation stage, showed a positive correlation with garlic yield and slightly negative with dry mass, bulb height and burdock.

Key words: Soil management. Morphological characters. Precision agriculture. *Allium sativum* L.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 Aspectos da cultura do alho	12
2.2 Análise de trilha	12
2.3 A geoestatística na pesquisa agronômica.....	13
2.3.1 Semivariograma	13
2.3.2 Krigagem.....	15
2.3.3 Semivariograma cruzado.....	15
2.3.4 Cokrigagem	16
2.4 Análise Bivariada de Moran	16
3 REFERÊNCIAS	17
4 CAPÍTULO 1 - Variabilidade espacial dos componentes produtivos da cultura do alho (<i>Allium sativum</i> L.) irrigado	19
Resumo	19
Abstract.....	19
4.1 Introdução	20
4.2 Material e Métodos	21
4.3 Resultados e discussão.....	24
4.4 Conclusão.....	33
4.5 Referências.....	34
5 CAPÍTULO 2 - Análise espacial e mapeamento do efeito da irrigação e do nitrogênio no superbrotamento do alho	36
Resumo	36
Abstract.....	36
5.1 Introdução	37
5.2 Material e Métodos	38
5.3 Resultados e discussão.....	42
5.4 Conclusão.....	50
5.5 Referências.....	50
6 CAPÍTULO 3 - Contribuição de variáveis morfológicas para a produtividade de alho	53
Resumo	53
Abstract.....	53
6.1 Introdução	54
6.2 Material e Métodos	55
6.3 Resultados e discussão.....	60
6.4 Conclusões	63
6.5 Referências.....	63
7 CAPÍTULO 4 - Relações lineares e espaciais entre condutividade elétrica e atributos físicos do solo e a produtividade e superbrotamento do alho irrigado.....	65
Resumo	65
Abstract.....	65
7.1 Introdução	66
7.2 Material e Métodos	67
7.3 Resultados e discussão.....	70
7.4 Conclusão.....	79
7.5 Referências.....	79
8. APÊNDICE	82

1 INTRODUÇÃO

O alho (*Allium sativum* L.) é um alimento altamente nutritivo, reconhecido como uma excelente fonte proteica de carboidratos, vitaminas, minerais e fibras, que podem reduzir a incidência de doenças. O alho é um dos produtos agrícolas de maior importância socioeconômica no Brasil, em razão da geração de muitos empregos durante o ciclo da cultura em diversas regiões produtoras do país.

O aumento da produtividade do alho pode ser obtido com a utilização de diversas tecnologias como adubação, genótipos adequados às condições da área, manejo adequado do solo e da irrigação levando em consideração a variabilidade espacial dos índices fenológicos da planta e os atributos do solo.

A irrigação é uma técnica bastante eficiente para promover o aumento da produtividade das culturas. As áreas irrigadas no mundo representam cerca de 20% da área total cultivada, mas são responsáveis por, aproximadamente, 40% da produção (FAO, 2015).

Oliveira et al. (2018) e Ferraz et al. (2017) estudaram a relação existente entre atributos da planta e produtividade por meio da geoestatística, que é uma ferramenta que vem sendo muito utilizada para identificar as variáveis dependentes que apresentam variabilidade espacial e que influenciariam na tomada de decisão quanto às práticas de manejo do solo e da cultura, evidenciando melhores resultados no incremento de produtividade e mantendo ou melhorando a qualidade do solo.

Segundo Cruz et al. (2012), a análise de trilha é caracterizada por conferir associações que permitem determinar as inter-relações de causa e efeito nos caracteres estudados. Em melhoramento genético, é comumente utilizada para determinar a importância de caracteres primários e secundários da cultura e indicar a seleção indireta de genótipos promissores através de caracteres de interesse. Nogueira et al. (2012) relatam que a compreensão das associações entre caracteres é imprescindível ao melhoramento genético por auxiliar no direcionamento do processo de seleção.

Com base nesses fatores, o objetivo neste trabalho foi definir os atributos do solo e da planta que melhor explicam a variabilidade da produtividade e do superbrotamento do alho e evidenciar as associações diretas e indiretas dos principais componentes relacionados à produtividade da cultura do alho irrigado por meio da análise de trilha.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos da cultura do alho

O alho é amplamente cultivado no nosso país e é gerador de renda e empregos, pois quase 100% das atividades necessitam de esforços manuais. Hoje, a cultura emprega mais de 150 mil trabalhadores em todo o país e outros quatro mil agricultores familiares, localizados, sobretudo, na região Sul do Brasil, que tem o alho como a principal fonte de renda. Os produtores nacionais são responsáveis por abastecer 45% do mercado interno (ANAPA 2019).

Entre as culturas cultivadas usualmente sob irrigação, pode-se citar o alho, produto com alta demanda no Brasil e no mundo, bastante valorizado na culinária de diversos países sendo uma cultura agregada com alto valor econômico. Durante a fase de diferenciação dos bulbilhos, o excesso de água e a adubação nitrogenada podem provocar um fenômeno denominado superbrotamento ou superborbulhamento. Para diminuir a incidência dessa anomalia fisiológica, normalmente é aplicado um stress hídrico durante essa fase fenológica, pois quando ocorre o superbrotamento os bulbilhos da planta atingem tamanhos muito pequenos, provocando queda brusca no seu valor comercial (MACÊDO et al., 2006).

2.2 Análise de trilha

Visando a compreender melhor as associações entre diferentes caracteres, Wright (1921) propôs um método de desdobramento das correlações estimadas em efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas sobre uma variável principal. Este método foi denominado de análise de trilha (“Path analysis”). Dewey e Lu (1959) foram os primeiros pesquisadores a utilizar esta metodologia em plantas. Os mesmos autores destacaram que os métodos de correlação linear e regressão múltipla foram os primeiros a serem utilizados nas análises de componentes de rendimento. No entanto, a análise de trilha pode detectar alguns efeitos diretos ou indiretos que atuam sobre o rendimento, que produzem associações particulares sobre esse efeito.

A análise de trilha apresenta particularidades por ser um coeficiente de regressão e revelar direções positivas ou negativas. Caracteriza-se como um coeficiente padronizado, o que permite relacionar caracteres aferidos em diferentes unidades físicas, não expressando notações em seus resultados (CRUZ et al., 2012). Na genética, é necessário identificar quais caracteres revelam alta correlação com o caractere principal, onde o efeito direto deve ter sentido favorável à seleção, em contrapartida, sentidos opostos entre a correlação total e os efeitos diretos indicam ausência de associação de causa e efeito (CRUZ et al., 2004).

2.3 A geoestatística na pesquisa agrônômica

No estudo da variabilidade do solo, segundo Carvalho (1991), podem ser utilizados basicamente dois enfoques que diferem na forma de análise dos dados, os métodos estatísticos de rotina, aplicados às amostras de populações, denominados simplesmente de estatística clássica, que exigem a validade de algumas hipóteses básicas, tais como a independência espacial entre as observações e a distribuição normal dos dados. Entretanto, a geoestatística, que vem apresentando aplicação crescente na avaliação da variabilidade espacial de atributos de interesse em ciências agrárias, permite a interpretação dos resultados com base na sua estrutura da variabilidade natural, partindo do pressuposto da existência de uma dependência espacial entre os dados pesquisados, dentro do espaço de amostragem no campo.

A geoestatística pode indicar alternativas de manejo que propiciem a minimização do efeito da variabilidade dos atributos do solo sobre os cultivos (ALVES et al. 2014). Assim, é possível modelar e analisar a variabilidade espacial dos atributos de interesse agrícola gerando mapas de variabilidade espacial sem tendência e com variância mínima por meio da técnica de interpolação por krigagem (MONTANARI et al. 2011).

2.3.1 Semivariograma

Na geoestatística, a dependência espacial apresentada pelos dados pode ser estimada pelo semivariograma, pressuposto da estacionaridade da hipótese intrínseca, que é a representação gráfica do ajuste de modelos matemáticos aos dados observados. O semivariograma define o tipo e a forma da associação espacial e, segundo Vieira et al. (1983), constitui-se no início da análise geoestatística. O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de mapeamento por krigagem, permitindo representar quantitativamente a variação de uma ocorrência no espaço (EMBRAPA, 2004).

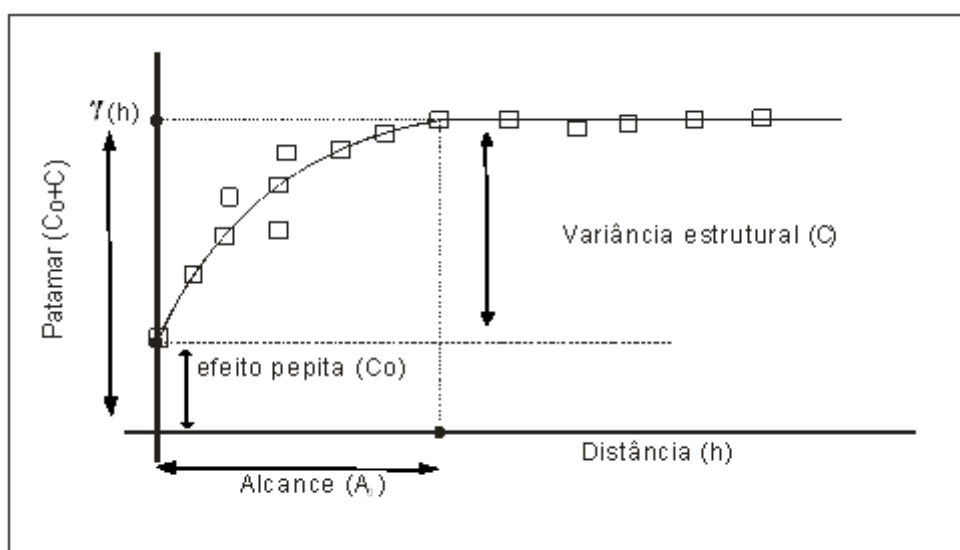
O semivariograma é uma função que relaciona a semivariância com o vetor distância, ou seja, um gráfico que caracteriza a estrutura de dependência espacial da variável (ou variáveis) sob estudo, podendo ser representada analítica e/ou graficamente, sendo estimado pela seguinte equação:

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

em que: $N(h)$ é o número de pares experimentais de dados separados pelo vetor h e Z representa os valores medidos para atributos do solo ou da cultura. Geralmente, o

semivariograma é representado pelo gráfico de $\gamma(h)$ versus h . O esquema mostrado na Figura 1 expressa o comportamento típico de um semivariograma experimental de um atributo que apresenta dependência espacial. Pontos próximos entre si são mais semelhantes do que pontos mais afastados. A função de semivariância quantifica a dissimilaridade entre os pontos, ao contrário da correlação (VIEIRA et al., 1981).

Figura 1 - Exemplo de semivariograma experimental, teórico, com os parâmetros C_0 (efeito pepita), C_0+C (patamar) e (A_0) alcance



Fonte: Vieira et al. (1981).

O efeito pepita (C_0) refere-se ao erro ou à variabilidade não explicada. É iniciado com um baixo valor e aumenta à medida que h cresce, até uma distância, denominada alcance, representada por " A_0 ", que determina a distância até a qual o atributo se apresenta espacialmente dependente. A partir desta distância, os dados podem ser considerados independentes. O alcance é representado pela distância em que os valores de um determinado atributo são iguais entre si. Os valores de um atributo, localizados dentro da área cujo raio é igual ao seu valor, tem entre si extrema semelhança em magnitude, mas passam a assumir valores independentes, maiores ou menores, somente para as distâncias estabelecidas a partir do seu valor (VIEIRA et al., 1981). No ajuste dos modelos experimentais são considerados para cada atributo o efeito pepita (C_0), alcance (A_0) e o patamar (C_0+C), o maior coeficiente de determinação (r^2), a menor soma dos quadrados dos desvios (SQD), e o maior grau da dependência espacial (ADE). O ajuste pode ser dado com a técnica da validação cruzada, definindo o tamanho da vizinhança que proporcionará a melhor malha de krigagem.

A classificação da dependência espacial (ADE) é feita conforme sugestões de Cambardella et al. (1994), modificada pelo GS⁺ (2004), conforme a seguinte expressão:

$$ADE = [C/(C+C_0)] 100 \quad (2)$$

em que $C+C_0$ é o patamar; ADE é a dependência espacial e C é a variância estrutural.

ADE tem a seguinte proposição: a) $ADE > 75\%$ indica variável espacial fortemente dependente; b) $25\% < ADE \leq 75\%$ indica variável espacial moderadamente dependente; e c) $ADE \leq 25\%$ indica variável espacial fracamente dependente. A validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas que efetuam a krigagem. Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da interpolação por krigagem, os mapas de krigagem para a interpretação e o detalhamento da variabilidade espacial dos atributos.

2.3.2 Krigagem

Com a técnica da interpolação, podemos estimar valores de atributos entre pontos amostrados, sem tendência e com variância mínima, podendo expressar os resultados em forma de mapas em duas dimensões ou em três dimensões. Levando-se em conta a modelagem da dependência espacial, o valor da variável espacial entre os pontos é estimado por combinação linear de valores medidos em outros locais vizinhos da variável, expressa pelo semivariograma. Pontos próximos dos locais não amostrados têm maior peso do que os afastados e aqueles agrupados têm maior peso do que os isolados. (VIEIRA et al., 1983; BORGELT et al., 1994).

A estimativa de valores para locais não amostrados, pela técnica de krigagem, possibilita estabelecer um mapa da área de estudo para os atributos do solo, permitindo a definição de linhas de isovalores, que podem ser de grande utilidade no planejamento experimental e na interpretação do comportamento espacial dos dados Burgess (1980), auxiliando no planejamento das atividades agrícolas e no fornecimento de subsídios para tomadas de decisões.

2.3.3 Semivariograma cruzado

Ferramenta da geoestatística, o semivariograma cruzado possibilita verificar a continuidade cruzada entre as variáveis regionalizadas, a avaliação da variabilidade de uma série acompanhada por outra, de forma direta ou indireta, como por exemplo, as propriedades

do solo e índices fenológicos da planta. Em ocasiões em que há correlação espacial entre duas propriedades, a estimativa de uma delas pode ser feita utilizando informações de ambas, que estão expressas no semivariograma cruzado, sendo o método chamado de cokrigagem, que pode ser mais preciso do que o da krigagem em si (VIEIRA, 1997; 2000).

2.3.4 Cokrigagem

A técnica de cokrigagem pode ser usada para calcular valores de uma propriedade do solo que seja difícil quantificar (por exemplo, a condutividade hidráulica), baseado em uma medição de fácil quantificação (por exemplo, o teor de argila), desde que haja correlação espacial. O conhecimento das relações entre as variáveis pode auxiliar na mensuração de estimativas de variáveis em função de outras características, sejam essas características do solo, ou da cultura que está sendo pesquisada (KIEHL 1979), modelada pelo semivariograma cruzado, onde se estima o valor de uma variável para um determinado local não amostrado pela cokrigagem, com base na correlação espacial de outra variável. Essa estimativa pode ser precisa da mesma forma que a krigagem (um atributo), ou até possibilitar maior precisão, quando o semivariograma cruzado mostrar dependência espacial entre dois atributos (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA, 2000).

2.4 Análise Bivariada de Moran

A dependência espacial pode ser medida de diferentes formas. O índice de Moran (I) é uma estatística muito difundida e determina a autocorrelação espacial a partir do produto dos desvios em relação à média. Este índice é uma medida global da autocorrelação espacial, pois indica o grau de associação espacial presente no conjunto de dados. De uma forma geral, o índice de Moran presta-se a um teste cuja hipótese nula é de independência espacial; neste caso, seu valor seria zero. Valores positivos entre 0 e +1 indicam correlação direta, valores negativos entre 0 e -1 correlação inversa (CARDOSO, 2005).

A análise de correlação espacial pode ser feita utilizando várias ferramentas. Como exemplo, o software GeoDA de fonte aberta e livre (ANSELIN et al., 2005) é uma poderosa forma de determinação do índice bivariado global de Moran e do índice de Moran bivariado local. Estes índices são usados para representar o grau de correlação espacial entre duas diferentes variáveis espaciais correlacionadas. O nível de pseudo-significância do índice de bivariada de Moran é testado usando a abordagem de randomização condicional (999 permutações) baseada no método de Monte Carlo (ANSELIN et al., 2005).

3 REFERÊNCIAS

- ALVES, V.; MONTANARI, R.; CARVALHO, M. P.; CORREA, A. R.; ROQUE, C. G. Atributos tecnológicos, stand e produtividade da cana planta correlacionados com aspectos da fertilidade do solo em Chapadão do Céu (GO). **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, MS, v. 1, n. 1, p. 75-91, 2014.
- ANSELIN, LUC; SYABRI, IBNU; KHO, YOUNGIHN. GeoDa: An introduction to spatial data analysis. **Geographical Analysis**, Columbus, v.38, n.1, p.5-22, 2005.
- BORGELT, S.C.; SEARCY, S.W.; STOUT, B.A.; MULLA, D.J. Spatially-variable liming rates - a method for determination. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.37, n.5, p.1499-1507, 1994.
- BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.31, n.3, p.315-331, 1980.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, p.1501-1511, 1994.
- CARDOSO, C. E. de P. Mobilidade em São Paulo – A Importância dos Fatores Socioeconômicos – XIX ANPET – **Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Recife, 2005.
- CARVALHO, T.M. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo através da Geoestatística. Lavras, 1991. 84p. Dissertação (Mestrado)– Escola Superior de Agricultura de Lavras, **Universidade Federal de Lavras**, Lavras, 1991.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Perspectivas para a agropecuária, safra 2016/2017**. Brasília: CONAB, 2017.(Sétimo levantamento v.4).
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P.C.S. **Métodos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa, UFV: Editora UFV. 2004, 480 p. v.1.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P.C.S. **Métodos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa, UFV: Editora UFV, 2012.
- DEWEY, D.R.; LU, K.H. A correlation path coefficient analysis of components of crested wheatgrass seed production. **Agronomy Journal**, Madison, v.51, p.515-518, 1959.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Embrapa-Cerrado, 2004. 209 p.
- FERRAZ, G. A. S. SILVA, F. M., OLIVEIRA, M. S., CUSTODIO, A. A. P., FERRAZ P.F.P. Variabilidade espacial dos índices fenológicos da planta de uma lavoura cafeeira. **Revista ciência Agrônômica**, v. 48, n. 1, p. 81-91, 2017.

GS⁺: **Geostatistics for environmental sciences**. 7. ed. Michigan, Plainwell: Gamma Desing Software, 2004. 159 p.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 561 p.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

MONTANARI, R.; LIMA, R. C.; BONINI, A. S.; MARQUES, L. S.; MINGUINI, R.; CARVALHO, M. P.; FERREIRO, J.; COSTA, N. R. Variabilidade dos atributos de um Latossolo Vermelho sob plantio direto no cerrado brasileiro e produtividade da soja. **Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe**, La Coruña-Espanha, v. 36, n.1, p. 61-78, 2011.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Indicadores da acidez do solo para recomendação de calagem no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.237-247, 2008.

NOGUEIRA, A. P. O.; SEDIYAMA, T.; SOUSA, L. B.; HAMAWAKI, O. T.; CRUZ, C. D.; PEREIRA, D. G.; MATSUO, E. Análise de Trilha e correlações entre caracteres em soja cultivadas em duas épocas de semeadura. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.28, n. 6, p. 877-888, 2012.

OLIVEIRA, J. T., DE PASSOS, M., ROQUE, C. G., BAILO, F. H. R., KAMIMURA, K. M., DA SILVA RIBEIRO, I., & TEODORO, P. E. Space variability of phenological indicators of common bean crop. **Bioscience Journal**, 34(2). 2018.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.45, p.1040-1048, 1981.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n.1, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p.181-190, 1997.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.1-53. v.1.

WRIGHT, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, v.20, p.557-585, 1921.

4 CAPÍTULO 1 - Variabilidade espacial dos componentes produtivos da cultura do alho (*Allium sativum* L.) irrigado

Resumo

Entre as culturas cultivadas usualmente sob irrigação, pode-se citar o alho, produto com alta demanda no Brasil e no mundo, bastante valorizado na culinária de diversos países, sendo uma cultura agregada com alto valor econômico. Este trabalho foi conduzido em 2018 em um Latossolo Vermelho Amarelo, tendo sido desenvolvido na Área de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil. O objetivo foi caracterizar a estrutura e a magnitude da distribuição espacial dos componentes produtivos da cultura do alho e fazer seu mapeamento para possibilitar a visualização da distribuição espacial e avaliar a correlação espacial existente entre a produtividade do alho e as variáveis da planta massa total, número de folhas, comprimento do pendão floral, comprimento da folha, largura da folha, diâmetro do pseudocaule, massa úmida, massa seca, número de bulbilhos por bulbo, massa de um bulbilho, raiz e irrigação amostradas em uma malha de 90 pontos georreferenciados. A análise dos dados por meio de técnicas estatísticas e da geoestatística possibilitou constatar que os componentes de produção e produtividade do alho, massa total, número de folhas, comprimento do pendão floral, comprimento da folha, largura da folha, diâmetro do pseudocaule, massa úmida, massa seca, massa de um bulbilho e irrigação apresentaram dependência espacial. Houve destaque na correlação espacial entre a produtividade do alho e a massa total da planta, largura da folha e massa de bulbilhos, mostrando que tem uma dependência espacial moderada.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Geoestatística. Atributo de planta.

Abstract

Spatial variability of garlic (*Allium sativum* L.) production components irrigated

Among the crops that are usually grown under irrigation, one can mention garlic, which is a product with high demand in Brazil and the world, being highly valued in the cuisine of several countries and is an aggregated crop with high economic value. In the year 2018, this work was conducted in Yellow Red Latosol. The work was developed in the area of irrigation and drainage of the Federal University of Viçosa, in Viçosa, Minas Gerais, Brazil. The objective was to characterize the structure and magnitude of the spatial distribution of the phenological indices of the garlic plant and to map the phenological indices in order to visualize the spatial distribution and to evaluate the spatial correlation between productivity of garlic and plant variables: total mass, number of leaves, length of floral tassel, sheet length, sheet width, diameter of the pseudocaule, wet mass, dry mass, number of bulbs per bulb, mass of a tooth or mass of a bulb, root and irrigation sampled in a mesh of 90 georeferenced points. The analysis of these data through statistical and geostatistical techniques made it possible to verify that the production and productivity of garlic and plant variables: total mass, number of leaves, length of floral tassel, sheet length, sheet width, diameter of the pseudocaule, wet mass, dry mass, mass of a tooth or mass of a bulb and irrigation presented dependence space. The spatial correlation between garlic yield and total plant mass, leaf width and bulb mass, showed a moderate spatial dependence.

Key words: Precision agriculture. Geostatistics. Attribute plant.

4.1 Introdução

O alho é cultivado em praticamente todo o território nacional, sendo reconhecido como uma excelente fonte de proteínas, de vitaminas, minerais e fibras, que nutrem e reduzem a incidência de doenças, além de ser um alimento componente da dieta do brasileiro. No ano de 2017, a área total cultivada com alho foi de 11.130 hectares e a produção alcançou cerca de 79.721 mil megagramas, obtendo uma produtividade média nacional de 7 Mg ha⁻¹ (IBGE, 2018).

Entre as culturas cultivadas usualmente sob irrigação, pode-se citar o alho, produto com alta demanda no Brasil e no mundo, bastante valorizado na culinária de diversos países sendo uma cultura agregada com alto valor econômico.

Com o aumento da utilização da agricultura de precisão no Brasil, o estudo geoestatístico dos componentes produtivos das plantas relacionados com a produtividade das culturas vem se intensificando (OLIVEIRA et al., 2018). Ferraz et al. (2012) definem agricultura de precisão como um conjunto de técnicas e tecnologias capaz de auxiliar o produtor a manejar sua lavoura, visando ao aumento da produção e da renda, melhor eficiência nas técnicas de adubação, de colheita e de pulverização, contribuindo para uma melhor qualidade final do produto.

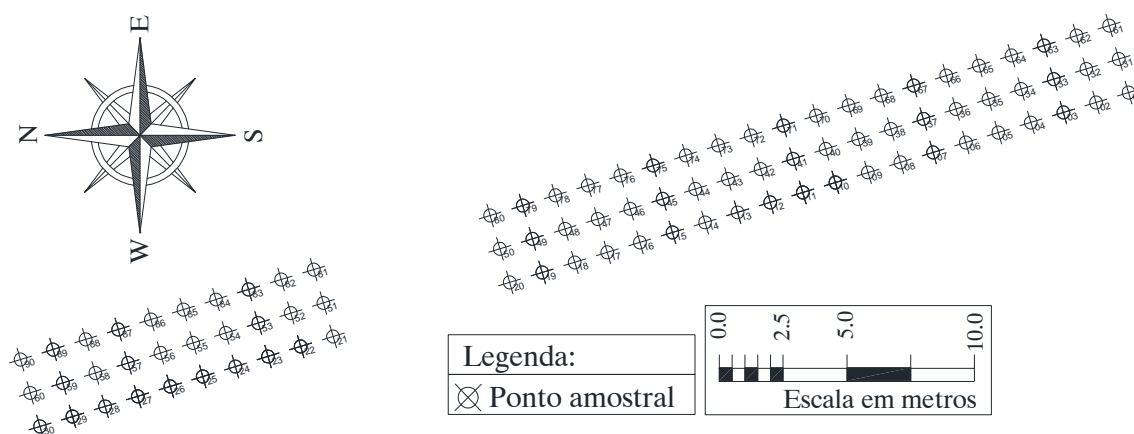
No âmbito da geoestatística, a técnica auxilia os programas computacionais empregados na agricultura de precisão, ou seja, os dados gerados e ajustados da interpolação simples de dados (krigagem) e da interpolação cruzada (cokrigagem) entre atributos da planta versus outro atributo, servindo como base para estimar a variabilidade espacial de determinada variável por meio de outra com facilidade de determinação (Montanari et al., 2015).

A produtividade do alho, número de folhas, comprimento da folha, largura da folha, diâmetro do pseudocaule e número de bulbilhos por bulbo foram estudados por VIANA et al (2015). Os números de grãos por planta, vagem por planta, grãos por vagem, massa de cem grãos e a produtividade da planta de feijão foram mapeadas por Silva et al (2011). Ferraz et al. (2017) mapearam o comprimento e diâmetro do caule de uma planta cafeeira. Montanari et al. (2015) estudaram a quantidade de matéria seca da planta. O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de caracterizar a estrutura e a magnitude da distribuição espacial de componentes produtivos da planta em lavoura de alho e fazer o mapeamento desses componentes produtivos, de forma a visualizar a distribuição espacial e avaliar a correlação espacial existente entre a produtividade do alho e as variáveis da planta.

4.2 Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido na Área de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil, nas proximidades das coordenadas geográficas: 23 K, 722569.09 m E; 7701897.59 m S (UTM) (Figura1). De acordo com Köppen e Geiger o clima é classificado como Cwa. 20.6 °C é a temperatura média em Viçosa. O verão tem muito mais pluviosidade que o inverno e a pluviosidade média anual é de 1229 mm.

Figura 1 - Malha amostral e detalhamento da amostragem da Área de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil



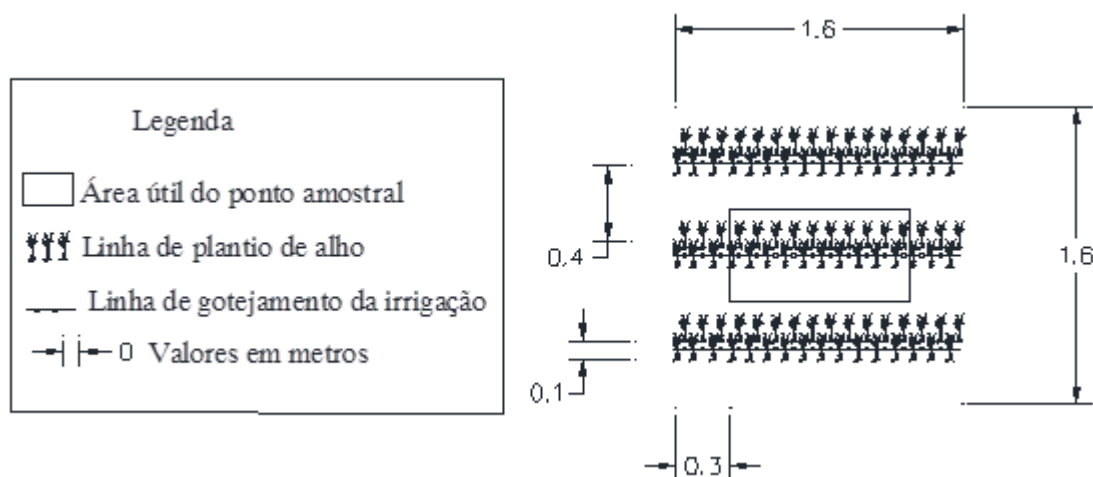
Fonte: O autor.

O solo em que as malhas experimentais foram instaladas foi classificado segundo EMBRAPA (2018) como Latossolo Vermelho Amarelo argilo-arenoso. Os valores da análise granulométrica na profundidade de 0,0 a 0,2 m foram de 460, 150 e 390 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente. O pH em H₂O foi 6,0 e o teor de matéria orgânica, igual a 2,18 dag kg⁻¹. Já os valores de P e K foram 21,2 e 135,0 mg dm⁻³, respectivamente. A soma de bases foi de 3,7 cmol_c dm⁻³ e a CTC total do solo foi de 6,1 cmol_c dm⁻³.

Na área de condução da lavoura, com sistema de plantio convencional em área irrigada, foram feitas aração e gradagem e usada enxada rotativa para confecção dos canteiros para plantio do alho. O plantio foi feito em 07/05/2018, utilizando cultivar Ito, de alho nobre roxo. Cada ponto amostral foi constituído por um canteiro com 1,60 m de largura e 1,60 m de comprimento, totalizando uma área de 2,56 m², sendo 3 linhas duplas de alho, com área útil composta pela linha central, tendo as adjacentes sido utilizadas como bordadura. As extremidades (0,30 m) da linha central também foram desconsideradas para fins de avaliação, sendo utilizadas como bordadura. Como pode ser visto na Figura 2, o espaçamento entre as

linhas duplas foi de 0,40 m e de 0,10 m entre as linhas da linha dupla (MAROUELLI et al., 2014).

Figura 2 - Croqui do canteiro de plantio representando um ponto amostral



Fonte: O autor.

Foram definidas direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas e feito o estaqueamento da malha experimental próximo ao final do ciclo do alho, isto é, no segundo decêndio de setembro/2018, espaçadas de 1,60 m entre elas. Cada malha experimental foi constituída de três transeções de 48 m x 1,6 m. Portanto, as transeções foram espaçadas de 1,60 m, com 90 pontos amostrais esquadrejados em 1,60 m x 1,60 m.

Os componentes produtivos determinados foram individualmente coletados na área útil do ponto amostral, que era composto por 1 linha dupla com 1,00 metro de comprimento, totalizando 20 plantas. A etapa laboratorial das análises foi feita entre os meses de outubro e novembro de 2018.

A produtividade do alho (PR) foi determinada pesando a massa do bulbo, expressa em kg ha^{-1} . A massa total (MT) foi determinada após secagem em galpão durante 30 dias após a colheita e consistiu no peso da massa da planta de alho completa em gramas. O número de folhas (NF) é correspondente à quantidade de folhas contidas em uma planta de alho, adimensional. O comprimento do pendão floral (CP) refere-se ao comprimento da junção entre a raiz e o bulbo até o final do botão floral em centímetros. O comprimento da folha (CF) refere-se ao comprimento da junção entre raiz e bulbo até o final da enésima folha da planta de alho, em centímetros. A largura da folha (LF) da enésima folha da planta de alho foi obtida medindo-se com um paquímetro, em milímetros. O diâmetro do pseudocaule (DC) foi obtido com auxílio de um paquímetro medindo-se o hipocótilo da planta, expresso em milímetros. A

massa úmida (Mu) refere-se à determinação da massa da parte aérea da planta do alho (exceto bulbo e raiz) após 30 dias da colheita e seca em galpão, expressa em gramas. A massa seca (MS) foi obtida após secagem em estufa a 105 °C por aproximadamente 72 horas até que a massa permaneceu constante, em gramas. O número de bulbilhos (DE) foi determinado pela contagem de dentes existente em cada bulbo, adimensional. A massa de um dente (MD) ou massa de um bulbilho foi determinada com o uso de balança de precisão em gramas. A raiz (RA) refere-se a quantidade de raízes de uma planta sem terra e seca ao ar após 30 dias de colhida em gramas. A irrigação (IRR) com déficit aplicada na formação dos bulbilhos foi determinada mensurando a quantidade de água aplicada durante todo o ciclo da cultura, expresso em milímetros. No intuito de proceder ao monitoramento da necessidade hídrica da cultura durante a condução do experimento, foi instalado dentro da área de plantio um aparelho denominado Irrigâmetro (Oliveira, 2008).

Para cada índice fenológico estudado, foi feita uma análise descritiva clássica com auxílio do programa estatístico Rbio (biometria no R) versão 17, tendo sido calculados a média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e feita a análise da distribuição de frequência dos dados. Desta forma, para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade dos componentes produtivos (x), foi utilizado o teste de Shapiro e Wilk (1965) a 5%. Neste teste a estatística testa a hipótese nula, que julga ser a amostra proveniente de uma população com distribuição normal.

Para caracterização da estrutura e da magnitude da dependência espacial dos componentes produtivos da planta do alho, foram feitos os ajustes de semivariograma, e a estimativa da semivariância estimando os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma denominado de efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C), e o alcance (A_0). Após o ajuste dos semivariogramas, foi feita a interpolação dos dados por krigagem de forma a possibilitar a visualização dos padrões de distribuição espacial dos componentes produtivos do alho, por meio de mapas. Foram gerados mapas de erro padrão da predição por krigagem. A validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas simples e cruzados, que efetuarão, respectivamente, a krigagem e a cokrigagem. Na sua análise, cada ponto contido dentro do domínio espacial é removido individualmente, sendo seu valor estimado como se ele não existisse. Dessa forma, pode-se construir um gráfico de valores estimados versus observados para todos os pontos.

4.3 Resultados e discussão

Os dados da análise descritiva dos componentes produtivos da planta em estudo estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Estatística descritiva para os componentes produtivos da cultura do alho

Índice Fenológico	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV (%)	Cur-tose	Assi-metria	Pr<w	DF
PR	10351,02	8370,36	12518,51	840,39	8,12	-0,11	-0.10	0,6587	NO
MT	81,09	66,10	99,00	6,55	8,08	0,07	0,05	0,6919	NO
NF	8,28	6,33	10,50	0,88	10,62	-0,35	0,02	0,6683	NO
CP	91,47	82,00	101,83	3,61	3,95	0,34	0,30	0,7137	NO
CF	94,13	80,83	108,17	5,71	6,07	-0,19	0,20	0,8068	NO
LF	12,05	7,87	17,09	1,98	16,40	-0,47	0,43	0,0423	TN
DC	11,81	9,53	14,50	0,96	8,12	-0,20	0,18	0,9815	NO
Mu	38,07	25,67	49,33	5,37	14,11	-0,77	-0.10	0,4264	NO
MS	12,17	9,17	16,00	1,41	11,62	-0,42	0,06	0,7159	NO
DE	13,57	11,33	15,00	0,72	5,33	0,30	-0.40	0,0956	NO
MD	3,15	2,53	3,77	0,27	8,50	-0,60	-0,11	0,6641	NO
RA	1,82	1,20	2,50	0,23	12,71	0,82	-0,08	0,0923	NO
IRR	194,91	129,40	225,68	22,40	11,49	1,05	-1,34	1×10^{-8}	IN

Produtividade do alho, kg ha⁻¹ (PR), massa total, g (MT), número de folhas (NF), comprimento do pendão floral, cm (CP), comprimento da folha, cm (CF), largura da folha, mm (LF), diâmetro do pseudocaule, mm (DC), massa úmida, g (Mu), massa seca, g (MS), número de dentes (bulbilhos) (DE), massa de bulbilhos (dentes), g (MD), raiz, g (RA), e interferência do componente externo, irrigação com déficit aplicada na formação dos bulbilhos, mm (IRR). CV = coeficiente de variação. DF = distribuição de frequência - NO, do tipo normal, TN, tendendo a normal, IN, indeterminado.

Tendo como referência a análise dos valores mínimos e máximos, da média e, também, da variância dos valores dos componentes produtivos da cultura do alho, é possível perceber uma variação considerável nos dados. Porém, apenas o conhecimento desta variação não é suficiente para identificar os locais onde se encontram os valores altos de um atributo, nem os locais onde se encontram os valores mais baixos. Neste caso, o uso da geoestatística se torna necessário para identificar se há variabilidade espacial e como esta variabilidade se dá na área em estudo, com a consequente confecção de mapas, de forma a permitir o gerenciamento mais preciso das intervenções de campo necessárias.

A Tabela 1 apresenta a análise descritiva dos componentes produtivos estudados. De acordo com Pimentel-Gomes e Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de variação (CV). Suas classes foram determinadas como baixa (CV < 10 %), média (10 % < CV < 20 %), alta (20 % < CV < 30 %) e muito alta (CV > 30 %). Portanto, todos os índices variaram de baixo a médio, sendo que a PR, MT, CP, CF, DC, DE e MD apresentaram baixa variabilidade. Já os demais componentes

produtivos - NF, Mu, MS, RA e interferência do componente externo IRR apresentaram médio coeficiente de variação. Viana et al. (2015), estudando a cultura do alho, encontraram coeficientes de variação baixos, o que confirmam o presente estudo para NF, CF, LF e DC, sendo eles, 5,03; 4,21; 7,60 e 9,51 %, respectivamente, tendo diferido a classificação do coeficiente de variação para os índices PR (15,82%) e DE (21,57%) que foram, segundo suas classificações, como médio e alto. As taxas de variabilidade, de média a baixa, encontradas para os componentes do alho, podem ser explicadas, possivelmente, pelo fato de o solo estudado (franco-argilo-arenoso) ser rico em nutrientes, padronizando, assim, o valor do coeficiente de variação dos componentes produtivos da cultura do alho.

O estudo dos componentes produtivos apresentou coeficientes de assimetria positiva para MT, NF, CP, CF, LF, DC e MS, respectivamente, de 0,05; 0,02; 0,30; 0,20; 0,43; 0,18 e 0,06 e negativa para PR, Mu, DE, MD, RA e IRR de -0,10; -0,10; -0,40; -0,11; -0,08 e -1,34, respectivamente. Já os coeficientes de curtose positiva para MT, CP, DE, RA e IRR foram de 0,07; 0,34; 0,30; 0,82 e 1,05, respectivamente. Os componentes produtivos PR, MT, NF, CP, CF, DC, Mu, MS, DE, MD e RA foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que suas respectivas probabilidades foram de 0,6587; 0,6919; 0,6683; 0,7137; 0,8068; 0,9815; 0,4264; 0,7159; 0,0956; 0,6641 e 0,0923. Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira et al. (2018) para produtividade e diâmetro do caule em estudo com feijão, tendo os autores supracitados obtido distribuição de frequência do tipo normal. Já Montanari et al. (2013), encontraram distribuição de frequência do tipo tendendo a normal para matéria seca de braquiária.

A produtividade média do alho foi de 10.351,02 kg ha⁻¹, estando dentro dos valores encontrados em alho irrigado com alta tecnologia. Resultados semelhantes foram encontrados por Macedo et al. (2006), que obtiveram produtividades médias do alho de 9.760 kg ha⁻¹ e por Prato-Sarmiento (2016), que estimou produtividade de 9.500 kg ha⁻¹. O IBGE estimou a produtividade média do alho no Brasil, no ano de 2017, em 7.162 kg ha⁻¹.

A análise geoestatística, Tabela 2, evidenciou dependência espacial para os semivariogramas dos componentes produtivos CP, LF e IRR, que se ajustaram ao modelo esférico, enquanto PR, MT, NF e MS se ajustaram ao modelo exponencial, concordando com Montanari et al. (2013), que mencionaram que os modelos esféricos e exponenciais se apresentam como teóricos mais comuns aos atributos do solo e da planta. Mas os componentes produtivos CF, DC, Mu e MD se ajustaram ao modelo gaussiano. Os componentes produtivos DE e RA obtiveram efeito pepita puro.

Tabela 2 - Parâmetros estimados para o semivariograma simples dos componentes produtivos da cultura do alho

Índice Fenológico ^(a)	Modelo ^(b)	Pepita C _o	Patamar C _o +C	Alcance A _o (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação Cruzada		
							%	Classe	a	b	r
PR	exp	3,86x10 ⁶	7,72x10 ⁶	12,6	0,71	1,63x10 ¹⁰	50,0	Moderada	7367,80	0,60	0,35
MT	exp	11,4	47,7	7,3	0,44	244,0	76,1	Forte	19,46	0,76	0,36
NF	exp	0,18	0,76	5,2	0,57	0,04	76,3	Forte	-1,31	1,16	0,49
CP	esf	7,00	15,00	9,0	0,71	12,70	53,3	Moderada	2,35	0,97	0,52
CF	gau	16,00	39,00	17,0	0,83	176,00	59,0	Moderada	2,00	0,98	0,68
LF	esf	2,00	4,7	20,0	0,79	1,46	57,4	Moderada	-0,14	1,01	0,62
DC	gau	0,47	0,94	4,0	0,77	0,02	50,0	Moderada	0,67	0,94	0,46
Mu	gau	15,3	35,5	13,7	0,78	102,00	56,9	Moderada	0,58	0,99	0,63
MS	exp	0,51	2,13	6,0	0,52	0,13	76,1	Forte	5,08	0,58	0,28
DE	epp	0,52	0,52	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	gau	0,06	0,08	25,0	0,91	7,78x10 ⁻⁵	30,5	Moderada	0,58	0,82	0,31
RA	epp	0,05	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-
IRR	esf	208,00	595,00	14,3	0,50	5,81x10 ⁴	65,0	Moderada	-6,74	1,04	0,67

(a) Produtividade do alho, kg ha⁻¹ (PR), massa total, g (MT), número de folhas (NF), comprimento do pendão floral, cm (CP), comprimento da folha, cm (CF), largura da folha, mm (LF), diâmetro do pseudocaule, mm (DC), massa úmida, g (Mu), massa seca, g (MS), número de dentes (bulbilhos) (DE), massa de bulbilhos (dentes), g (MD), raiz, g (RA), e interferência do componente externo, irrigação com déficit aplicada na formação dos bulbilhos, mm (IRR). (b) esf = esférico, exp = exponencial, epp = efeito pepita puro e gau = gaussiano; (c) SQR = Soma do quadrado do resíduo; (d) ADE = avaliador da dependência espacial.

Pela classificação de Cambardella et al. (1994), são considerados como avaliação da dependência espacial (ADE) forte, os semivariogramas que têm um efeito pepita < 25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca > 75%. Segundo esta classificação os valores das variáveis MT, NF e MS apresentaram ADE forte, enquanto PR, CP, CF, LF, DC, Mu, MD e IRR apresentaram ADE moderado.

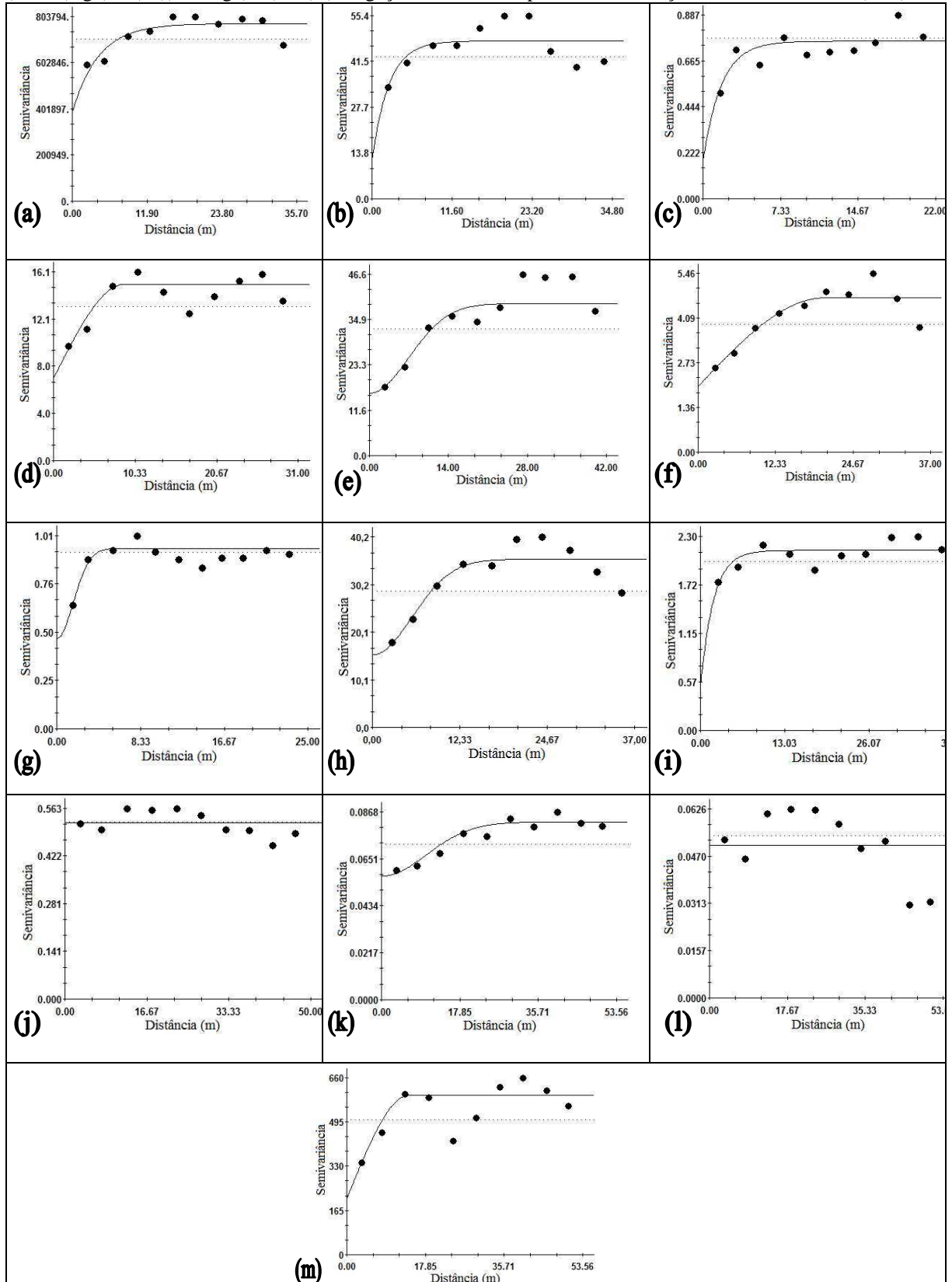
Os valores do alcance relativos aos semivariogramas têm uma importância considerável na determinação do limite da dependência espacial, o que pode ser também um indicativo do intervalo entre unidades de mapeamento de solos, (Trangmar; Yost; Uehara, 1985), ou também, dos componentes produtivos relacionados às plantas (Oliveira et al., 2018). O alcance encontrado pelas variáveis variou de 4,0 m (diâmetro de pseudocaule) a 25,0 m (massa de bulbilhos). Visando a auxiliar pesquisas nesta área, sugere-se que os valores dos alcances utilizados na geoestatística para alimentar os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, no geral, não sejam menores do que 4,0 m.

Após os ajustes dos semivariogramas, Figuras 3a, 3b, 3c, 3d, 3e, 3f, 3g, 3h, 3i, 3j, 3k, 3l e 3m, para cada componente produtivo da cultura do alho foram estimados valores por meio da krigagem ordinária. Desta maneira, foi possível construir mapas de distribuição espacial para as variáveis deste estudo, exceto DE e RA que tiveram efeito pepita puro,

Figuras 4a, 4b, 4c, 4d, 4e, 4f, 4g, 4h, 4i, 4j e 4k, que permitiram visualizar a variabilidade espacial na área.

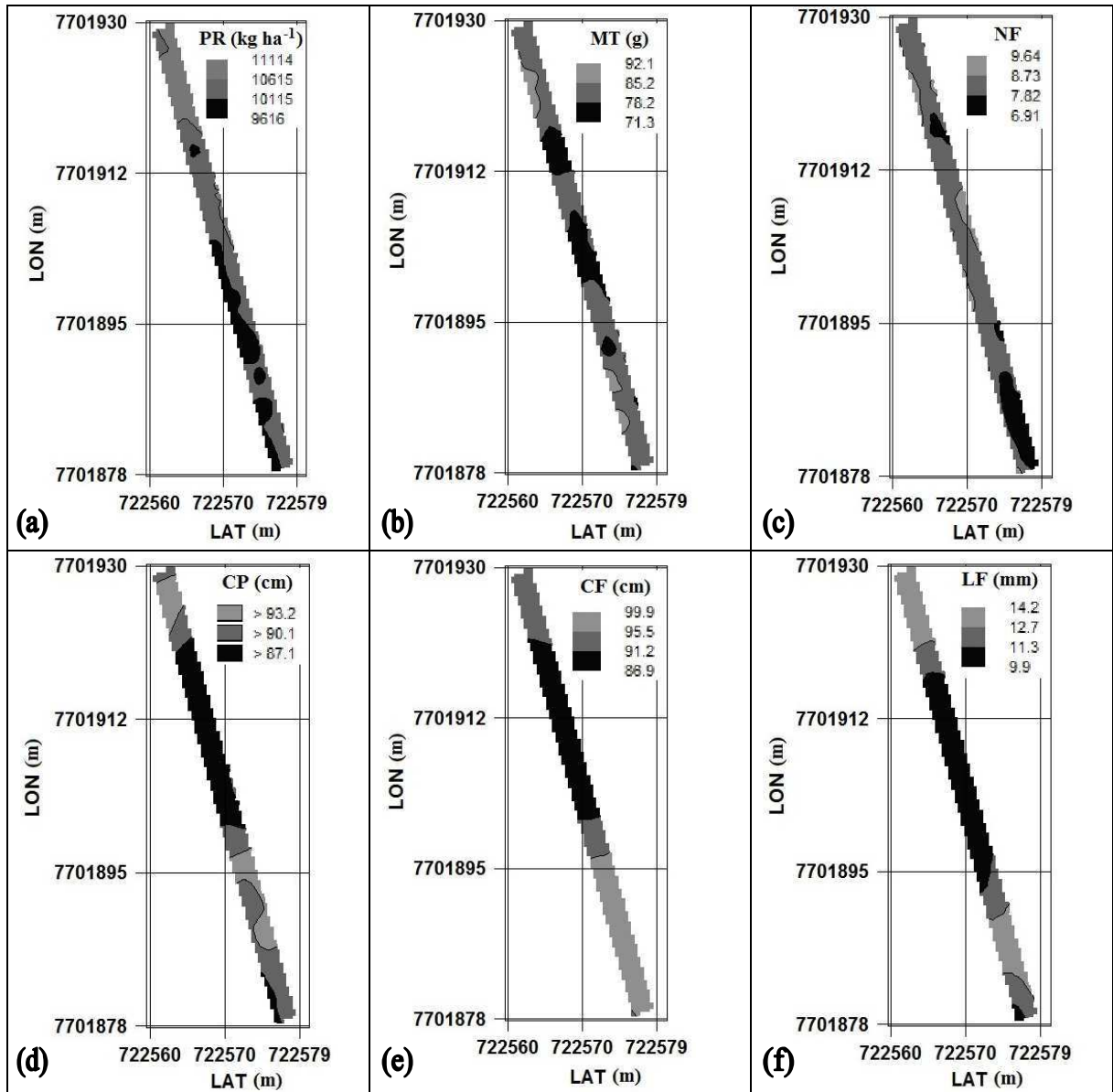
Quando se analisa o mapa de variabilidade espacial da produtividade, pode-se perceber que as regiões sul da área experimental apresentaram as menores produtividades da lavoura. Os maiores valores de produtividade foram observados na região norte da área. A observação de um mapa de produtividade, Figura 4a, em conjunto com a observação de outros tipos de mapas, como os de componentes produtivos da planta, pode contribuir para encontrar os motivos da ocorrência da variabilidade da produtividade. Essa identificação possibilita a correção de possíveis falhas, permitindo que, na próxima safra, os problemas possam ser minimizados. Desta forma, o agricultor pode tirar proveito das informações históricas da área provindas de mapeamentos anteriores para tomar as decisões necessárias para um correto manejo da cultura, identificando regiões onde há maior ou menor necessidade de intervenção, seja no solo ou na planta (OLIVEIRA et al., 2018).

Figura 3 - Semivariogramas dos componentes produtivos da planta do alho: (a) Produtividade do alho, kg ha^{-1} (PR), (b) massa total, g (MT), (c) número de folhas (NF), (d) comprimento do pendão floral, cm (CP), (e) comprimento da folha, cm (CF), (f) largura da folha, mm (LF), (g) diâmetro do pseudocaule, mm (DC), (h) massa úmida, g (Mu), (i) massa seca, g (MS), (j) número de dentes (bulbilhos) (DE), (k) massa de bulbilhos (dentes), g (MD), (l) raiz, g (RA), e (m) irrigação com déficit aplicada na formação dos bulbilhos, mm (IRR)



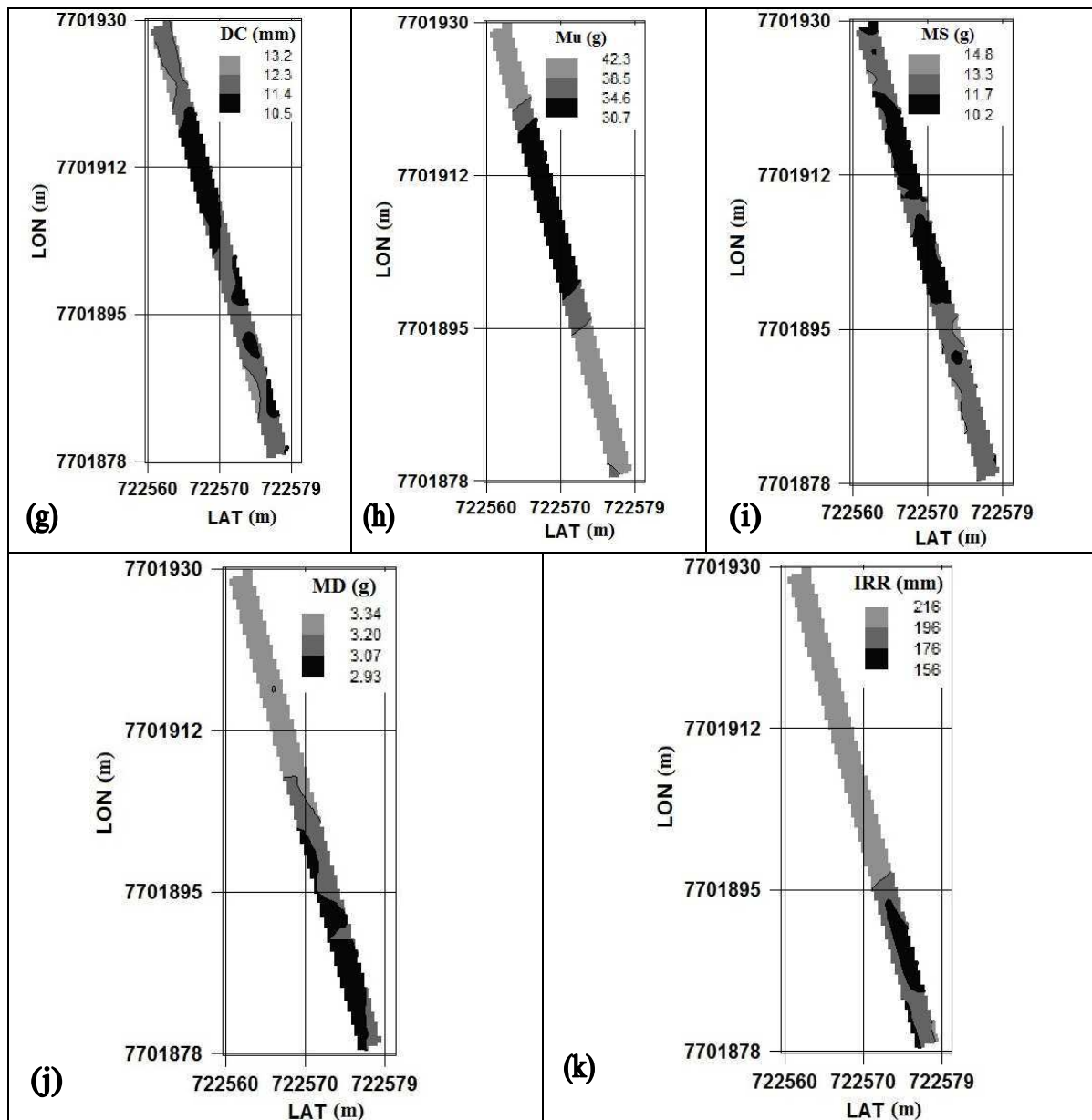
Fonte: O autor.

Figura 4 - Mapas de krigagem simples dos componentes produtivos da planta do alho (a) Produtividade do alho (PR), (b) massa total (MT), (c) número de folhas (NF), (d) comprimento do pendão floral (CP), (e) comprimento da folha (CF), (f) largura da folha (LF), (g) diâmetro do pseudocaule (DC), (h) massa úmida (Mu), (i) massa seca (MS), (j) massa de bulbilhos (dentes) (MD), (k) irrigação com déficit aplicada na formação dos bulbilhos (IRR)



Continua...

...Continuação:



Fonte: O autor.

Estes mapas podem ainda ser utilizados no gerenciamento da colheita, pois contribuirão na estimativa de produtividade, na logística e escolha do ponto de cura do alho no galpão, o que pode auxiliar para um melhor rendimento de beneficiamento do produto para comercialização.

Observando o mapa de distribuição espacial da massa total, Figura 4b, pode-se perceber que boa parte da área central está classificada como de baixo peso. Este indicativo é importante para o produtor, pois a massa é diretamente proporcional ao tamanho do bulbo,

mantido a uniformidade na umidade da lavoura, e se reflete na classificação da peneira de classificação do bulbo. Uma massa de plantas de alho padronizada é mais fácil de ser comercializada e, principalmente, possibilita maior facilidade de separação dos bulbos por peso obtendo padronização de produtividade.

O número de folhas por planta, Figura 4c, mostrou que a região sul da área apresentou as menores contagens. O comprimento da folha, Figura 4e, e sua largura, Figura 4f, foram menores nas partes centrais da área do estudo. Estes indicativos se refletem na taxa de fotossíntese feita pela planta, uma vez que menores tamanhos, larguras e quantidades de folhas implicam redução de absorção de luz (BREWSTER, 2008).

O comprimento do pendão floral, Figura 4d, foi mensurado em menor dimensão no centro da área, assim como o diâmetro do pseudocaule (Figura 4g). A diferenciação da inflorescência após a indução em baixa temperatura é favorecida, tendo seu crescimento em temperaturas relativamente baixas e fotoperíodos curtos, como, por exemplo, abaixo de 13 °C e 12 h. Estas condições causam início lento da inflorescência e seu surgimento, além de retardarem a formação de bulbos mais do que a formação de inflorescências (BREWSTER 2008).

Na porção da região sul do mapa foram encontradas as maiores massas úmidas e secas, Figuras 4h e 4i, respectivamente. As demais regiões variaram entre média e baixa produção de matéria seca. A quantidade deste atributo estudado pode ajudar na confecção de réstia (ou tranças) de alho, pois maior quantidade de matéria seca auxilia na sustentação da réstia (Figura 5).

Figura 5 - Réstia de alho



Fonte: O autor.

A massa de bulbilhos ou dentes é uma importante característica que indica seu desenvolvimento e contribui para a comercialização. Esta característica é intimamente relacionada ao manejo imposto à lavoura. Desta forma, a identificação da variabilidade espacial deste índice fenológico e seu consequente mapeamento podem colaborar com os produtores na identificação de distorções que estão ocorrendo em campo de forma a possibilitar sua correção. Os maiores valores de massa de bulbilhos foram observados na porção norte, Figura 4j, e os menores valores, identificados no sul. Bessa et al. (2017) descrevem que a percentagem de bulbilhos chochos (sem massa) ou índice de chochamento está entre os defeitos mais graves apontados pelas portarias ministeriais, sendo 15% o máximo permitido como limite para que o lote seja considerado do tipo comercial. A portaria N° 242/92 do Ministério da Agricultura prevê que, para pertencer ao grupo nobre, o alho deve apresentar, entre outras características, no máximo 20 bulbilhos por bulbo. O mercado consumidor de alho prefere bulbos de tamanho maior e com pequeno número de bulbilhos por bulbo, fato importante para a comercialização, pois bulbos com estas características alcançam as cotações mais elevadas (RESENDE, 1997).

A Tabela 2 apresenta os parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens da produtividade do alho e dos componentes produtivos da planta. A relação decrescente delas, analisada pela grandeza do coeficiente de correlação (r), foi a seguinte: 1) CF (0,68), 2) IRR (0,67), 3) Mu (0,63), 4) LF (0,62), 5) CP (0,52), 6) NF (0,49), 7) DC (0,46), 8) MT (0,36), 9) PR (0,35), 10) MD (0,31) e 11) MS (0,28). Por outro lado, os coeficientes angulares (b) das validações cruzadas variaram entre 1,16 (NF) e 0,58 (MS). A validação cruzada determina a confiabilidade dos valores interpolados, tendo sido, possível observar que os maiores erros para todas as variáveis em estudo, estão nas bordaduras da área e que nos locais mais próximos aos pontos amostrais estão os menores erros-padrão. Desta maneira, observa-se que as estimativas dos mapas das Figuras 4a, 4b, 4c, 4d, 4e, 4f, 4g, 4h, 4i, 4j e 4k foram bem feitas, pois os erros foram relativamente baixos com relação às variações apresentadas pelos componentes produtivos já descritos no Tabela 1.

Quando feito o semivariograma cruzado entre os componentes produtivos da planta, correlações espaciais positivas, Tabela 3, para a $PG = f(MT)$ (massa total), $PG = f(LF)$ (largura da folha) e $PG = f(MD)$ (massa de bulbilhos), foi observada uma moderada dependência espacial ($ADE = 59,8; 35,4$ e $33,3\%$, respectivamente), e modelo ajustado esférico para $PG = f(LF)$ e modelo gaussiano para $PG = f(MT)$ e $PG = f(MD)$. Estes resultados mostram uma relação direta entre a produtividade e os componentes de produção estudados, ou seja, pegando como exemplo a massa de bulbilhos, há um aumento da

produtividade. Oliveira et al. (2018) encontraram cokrigagem da produtividade de feijão em função da massa de grãos, ADE forte.

Tabela 3 - Parâmetros estimados para o semivariograma cruzado dos componentes produtivos da cultura do alho

Índice Fenológico ^(a)	Modelo ^(b)	Pepita Co	Patamar Co+C	Alcance Ao (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)	
							%	Classe
PR = f(MT)	gau	2,6x10 ³	3953.0	21,0	0,739	7,0x10 ⁵	33,3	Moderada
PR=f(LF)	esf	6,3x10 ²	634.0	33,6	0,721	4,7x10 ⁴	59,8	Moderada
PR = f(MD)	gau	1,9x10 ²	198.0	19,0	0,758	1,3x10 ³	35,4	Moderada

(a) PG = produtividade do alho, em função f(MT) = massa total, f(LF) = largura da folha, f(MD) = massa de bulbilhos. (b) esf = esférico e gau = Gaussiano; (c) SQR = Soma do quadrado do resíduo; (d) ADE = avaliador da dependência espacial.

O coeficiente de determinação espacial (r²) foi seguinte: 1) PR=f(MD) (0,758), 2) PR = f(MT) (0,739) e 3) PR = f(LF) (0,721), superiores a 0,700. Já a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do alcance (Ao), foi a seguinte: 1) PR=f(LF) (33,6) m, 2) PR=f(MT) (21,0) m e 3) PR=f(MD) (19,0) m. Assim, houve correlação linear significativa entre a PR e os demais componentes produtivos da planta do alho, com satisfatórios ajustes semivariográficos. Portanto, analisando a Tabela 3, pode-se inferir, como exemplo, que a massa de bulbilhos se apresentou como bom indicador da produtividade do alho quando destinada à estimação da produtividade em solo franco-argilo-arenoso.

4.4 Conclusão

Os componentes de produção e a produtividade do alho (PR), massa total (MT), número de folhas (NF), comprimento do pendão floral (CP), comprimento da folha (CF), largura da folha (LF), diâmetro do pseudocaule (DC), massa úmida (Mu), massa seca (MS), massa de um dente (MD) ou massa de um bulbilho e irrigação (IRR) apresentaram dependência espacial.

Houve destaque na correlação espacial entre a produtividade do alho e a massa total da planta, largura da folha e massa de bulbilhos, mostrando que tem uma dependência espacial moderada.

4.5 Referências

- BESSA, A. T. M., LOPES, W. D. A. R., SILVA, O, DA, M. D. P., LIMA, M. F. P. D., OLIVEIRA, P. R. H. D, & NEGREIROS, M. Z. D. Caracterização físico-química de alho ‘BRS Hozan’ e ‘Roxo Pérola de Caçador’ em função do tempo de armazenamento. **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**, 11(2), 368-377. 2017.
- BREWSTER, J. L. Onions and other vegetable alliums (Vol. 15). **CABI**. 2008.
- CAMBARDELLA, C. A. MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E.. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola- LSPA. Novembro 2018. Brasília. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura>> acesso em 28/12/2018.
- FERRAZ, G. A. S. SILVA, F. M., CARVALHO, L. C. C., ALVES, M. C., FRANCO, B. C. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 140-150, 2012.
- FERRAZ, G. A. S. SILVA, F. M., OLIVEIRA, M. S., CUSTODIO, A. A. P., FERRAZ P.F.P. Variabilidade espacial dos componentes produtivos da planta de uma lavoura cafeeira. **Revista ciência Agrônômica**, v. 48, n. 1, p. 81-91, 2017.
- MACÊDO, F. S., DE SOUZA, R. J., & PEREIRA, G. M. Controle de superbrotamento e produtividade de alho vernalizado sob estresse hídrico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41(4), 629-635. 2006.
- MARQUELLI, W. A.; BRAGA, M. B.; LUCINI, M. A.; RESENDE, F. V. Circular Técnica 136: Irrigação na cultura do alho. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Embrapa**, Brasília-DF. 24 P, 2014.
- MONTANARI R., CARVALHO, M. P., FILHO, M. C. M. T., DALCHIAVON, F. C. Produção de matéria seca da braquiária de acordo com os atributos químicos de um Latossolo em Selvíria, Mato Grosso do Sul. **Revista. Ceres**, Viçosa, v. 60, n.6, p. 772-784, nov/dez, 2013.
- MONTANARI R., PANACHUKI, E., LOVERA, L. H., CORREA, A. R., OLIVEIRA, I. S., QUEIROZ, H. A., TOMAZ, P. K. Variabilidade Espacial da Produtividade de Sorgo e de Atributos do Solo na Região do Ecótono Cerrado-Pantanal, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39:385-396, 2015.
- OLIVEIRA, J. T., DE PASSOS, M., ROQUE, C. G., BAIO, F. H. R., KAMIMURA, K. M., DA SILVA RIBEIRO, I., & TEODORO, P. E. Space variability of phenological indicators of common bean crop. **Bioscience Journal**, 34(2). 2018.

OLIVEIRA, R. A.; RAMOS, M. M. **Manual do irrigâmetro**. Viçosa, MG: UFV, 144 p. 2008.

PIMENTEL-GOMES, F. P., Garcia, C. H. (2002) **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba, FEALQ. 309p. 2002.

PRATO SARMIENTO, A. I. Avaliação financeira do alho (*Allium sativum* L.) roxo Nacional e Peruano no planalto Cundiboyacense, Colômbia. **Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria**; Vol. 17, Núm. 1; 43-53. 2016.

RESENDE, G.M. de. Desempenho de cultivares de alho no Norte de Minas Gerais. **Horticultura Brasileira**, v.15, p.127-130, 1997.

SILVA, A. L. M. S., MONTANARI R., CARVALHO M. P., LIMA E.S., COSTA N.R. Componentes de produção do feijão (*Phaseolus vulgaris*) correlacionados com componentes produtivos físicos de um Latossolo sob plantio direto em Selvíria-MS. **II Simpósio de Geoestatística Aplicado em Ciências Agrárias**, maio 2011.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika, London**, v.52, p.591-611, 1965.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S., UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, 38:45-94, 1985.

VIANA, J. P. G., DE JESÚS PIRES, C., PINHEIRO, J. B., DOS SANTOS VALENTE, S. E., DE ALMEIDA LOPES, Â. C., & GOMES, R. L. F. Divergência genética em germoplasma de alho. **Ciência Rural**, 46(2), 203-209. 2016.

5 CAPÍTULO 2 - Análise espacial e mapeamento do efeito da irrigação e do nitrogênio no superbrotamento do alho

Resumo

O alho é uma hortaliça condimentar reconhecida como fonte proteica e energética e de minerais, além de compostos sulfurosos que atuam em benefício da saúde. Seu cultivo é feito no outono-inverno, período em que há escassez de chuvas, necessitando de irrigação. Embora as áreas irrigadas no mundo representem cerca de 20% da área total cultivada, e sejam responsáveis por, aproximadamente, 40% da produção, a irrigação tem-se tornado um “insumo” cada vez mais limitante. O presente trabalho foi conduzido em um Latosolo Vermelho Amarelo de textura argilo-arenosa, na Área de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Objetivou-se avaliar se a variabilidade espacial de componentes de produção da planta e a utilização do sistema de manejo de irrigação e fertirrigação com déficit controlado afetam a produtividade e a incidência de superbrotamento do alho. Os componentes estudados foram produtividade do alho, irrigação, nitrogênio, superbrotamento, diâmetro do bulbo, altura do bulbo, volume do bulbo e índice de área foliar, amostrados em uma malha de 90 pontos georreferenciados. A análise destes dados por meio das técnicas estatísticas e da geoestatística possibilitou constatar que o aumento da produtividade tem relação direta com a altura e o diâmetro do bulbo e que o superbrotamento tem relação direta com o aumento da produtividade. Menores lâminas de água e menores doses de nitrogênio aplicadas na diferenciação dos bulbilhos implicam menores incidências de superbrotamento no alho, enquanto o aumento da irrigação e da fertirrigação com nitrogênio resulta em menores volumes de bulbos.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Geoestatística. Atributo. *Allium sativum* L.

Abstract

Spatial analysis and mapping of the effect of irrigation and nitrogen on garlic sprouting

Garlic is a seasoning vegetable recognized as a source of energy and protein and minerals, as well as sulphurous compounds that act for health. Its cultivation is carried out in autumn-winter, a period in which there is scarcity of rain requiring irrigation. Although irrigated areas in the world account for about 20% of the total area under cultivation, and account for approximately 40% of production, this has become an increasingly "limiting" input. The present work was conducted in a Yellow Red Latosol, in the irrigation and drainage area of the Federal University of Viçosa, in Viçosa, Minas Gerais, Brazil. The objective of this study was to evaluate if the spatial variability of plant production components and the use of the irrigation and fertirrigation management system with controlled deficit affect the productivity and the incidence of sprouting garlic. The studied components were productivity of garlic, irrigation, nitrogen, sprouting, diameter of the bulb, bulb height, bulb volume and leaf area index, sampled in a mesh of 90 georeferenced points. The analysis of these data through statistical and geostatistical techniques made it possible to verify that the increase in productivity is directly related to height and diameter of the bulb and that the sprouting is directly related to the increase in productivity. Lower water levels and lower doses of nitrogen applied in bulb differentiation imply lower incidence of garlic growth, while increased irrigation and fertigation with nitrogen results in lower bulb volumes.

Key words: Precision agriculture. Geostatistics. Attribute. *Allium sativum* L.

5.1 Introdução

Em 2050, a estimativa da população mundial será de 9,8 bilhões de pessoas (FAO 2015). Para promover o aumento da produção de alimentos de forma a atender a crescente demanda mundial, será necessário expandir as áreas de plantio ou utilizar técnicas para aumentar a produtividade das áreas já cultivadas.

O alho, embora utilizado basicamente como condimento, é reconhecido por ser excelente fonte proteica e energética, além dos minerais P, Mg e Na e de compostos sulfurosos, características que o tornam valorizado como medicamento fitoterápico e como alimento (BREWSTER & RABINOWITCH, 2000). Cultivado em praticamente todo o território nacional, com área total de 11.130 ha e produção de 79.721 mil t. no ano de 2017 (IBGE, 2018), sua produção foi ampliada nas últimas décadas graças ao cultivo de variedades nobres no Cerrado, fazendo uso da técnica da frigorificação (“vernalização”) do “alho-semente” (PUIATTI, 2017).

Apesar de a frigorificação do “alho-semente” possibilitar o cultivo de alhos nobres em ambientes nos quais as condições naturais do clima não permitem a bulbificação, essa técnica favorece o surgimento do distúrbio fisiológico do “superbrotamento” ou “pseudoperfilhamento” dos bulbos, sobretudo se associada ao manejo inadequado da irrigação e da adubação nitrogenada (PUIATTI, 2017). O superbrotamento é uma anomalia de causas genético-fisiológicas caracterizada pelo surgimento atípico de folhas de gemas laterais antes que elas formem as folhas normais constituintes de um bulbilho. Essa anormalidade, além de reduzir a produtividade de bulbos comerciais, deprecia o produto, fazendo com que seu valor de mercado seja comprometido (SOUZA & CASALI, 1986; PUIATTI, 2017).

O alho é uma hortaliça de época ou estação fria, em que grande parte do seu ciclo de cultivo no outono-inverno, que, no sudeste do Brasil, é caracterizado por período de escassez de chuvas, necessitando de irrigação (PUIATTI, 2017). A irrigação é uma técnica bastante eficiente para promover o aumento da produtividade das culturas. As áreas irrigadas no mundo representam cerca de 20% da área total cultivada, sendo responsáveis por, aproximadamente, 40% da produção (FAO, 2015).

A disponibilidade de água de qualidade tem decrescido a cada ano com as mudanças climáticas e com o aumento de sua demanda. Alguns fatores têm sido responsáveis pela crise hídrica: a diminuição das áreas de recarga, a poluição dos corpos hídricos, o desmatamento e

o aumento da utilização de água, de maneira geral (FAO, 2015). Assim, deve-se atentar para o uso eficiente da água na agricultura, adotando um correto manejo da irrigação.

Outra técnica que pode ser utilizada para diminuir o consumo de água na agricultura é a Irrigação com Déficit Controlado (Regulated Deficit Irrigation-RDI). Essa técnica consiste em aplicar certo nível de stress hídrico às culturas durante a fase fenológica menos sensível à falta de água. Todavia é importante ressaltar que uma das premissas dessa técnica é que o stress hídrico não promova a diminuição da produtividade quando comparada a um manejo com irrigação plena por todo o ciclo (CHAI et al., 2016).

Com o surgimento da agricultura de precisão no Brasil, o estudo geoestatístico dos componentes de produção das plantas relacionados com a produtividade de diversas culturas vem-se intensificando (OLIVEIRA et al., 2018a). Ferraz et al. (2012) definem agricultura de precisão como um conjunto de técnicas e tecnologias capaz de auxiliar o produtor a manejar sua lavoura, visando ao aumento da produção e da renda, melhor eficiência nas técnicas de adubação, colheita e pulverização, contribuindo para melhor qualidade final do produto.

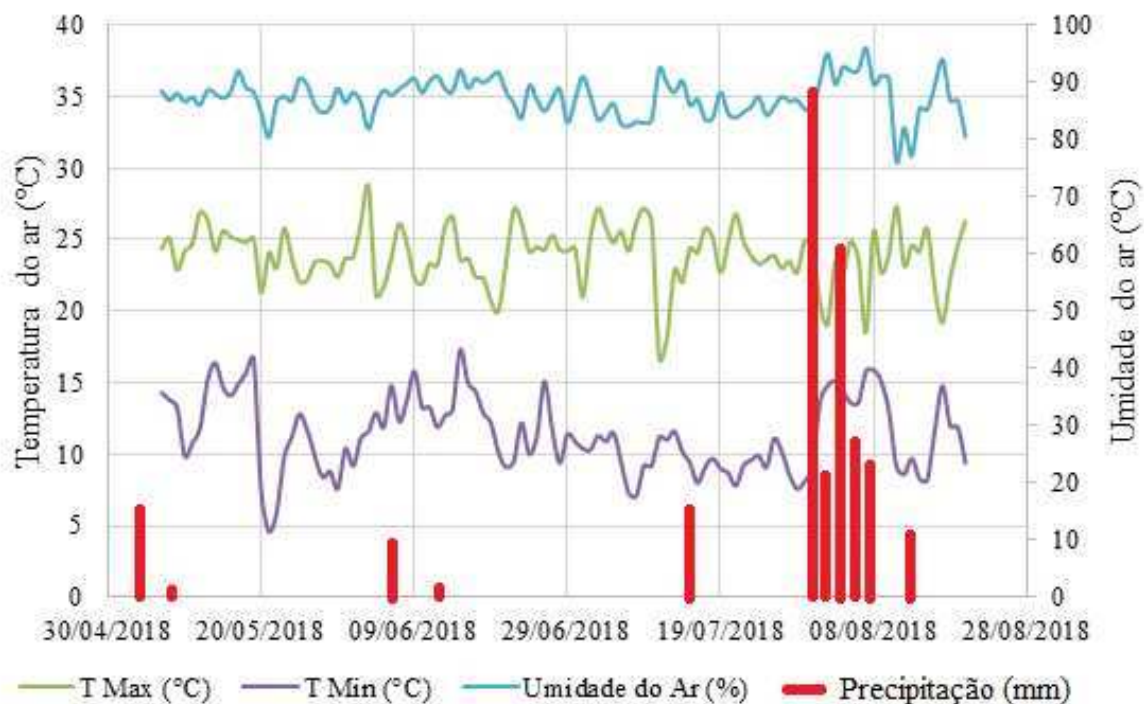
O estudo da técnica da geoestatística auxilia os programas computacionais empregados na agricultura de precisão, ou seja, os dados gerados e ajustados da interpolação simples de dados (krigagem) e da interpolação cruzada (cokrigagem) entre atributos da planta versus outro atributo servem como base para estimar a variabilidade espacial de determinada variável por meio de outra com facilidade de determinação (MONTANARI et al., 2015).

O objetivo deste trabalho foi avaliar se a variabilidade espacial de componentes de produção da planta e a utilização do sistema de manejo de irrigação e fertirrigação com déficit controlado interferem na produtividade e na incidência de superbrotamento em alho.

5.2 Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido na Área de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil, nas proximidades das coordenadas geográficas: 23 K, 722569.09 m E; 7701897.59 m S (UTM), (Figura1). De acordo com Köppen e Geiger, o clima é classificado como Cwa. A temperatura média em Viçosa é de 20,6 °C, com o verão chuvoso e o inverno seco. A pluviosidade média anual é 1229 mm. A Figura 1 apresenta os dados meteorológicos durante o experimento.

Figura 1 - Variação dos valores de temperatura máxima e mínima e de umidade relativa do ar ao longo do período experimental



Fonte: O autor.

O solo no qual as malhas experimentais foram instaladas foi classificado, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA 2018), como um Latossolo Vermelho Amarelo. Amostras de solo da camada de 0–20 cm foram coletadas para análises físicas e químicas. Os valores obtidos na análise granulométrica na profundidade de 0,0 a 0,2 m, foram de 46, 15 e 39 % de areia, silte e argila, respectivamente. O pH em H₂O foi de 6,0 e o teor de matéria orgânica, de 2,2 dag kg⁻¹. Já os valores de P e K foram 21,2 e 135,0 mg dm⁻³, respectivamente. A soma de bases e a CTC total do solo foram de 3,7 e 6,1 cmol_c dm⁻³ respectivamente. Não houve necessidade de calagem, uma vez que a saturação por bases já se encontrava acima de 70%, de acordo com recomendação de Souza et al. (1999).

A cultura foi instalada no campo em sistema de plantio convencional, ou seja, foram feitas aração, gradagem e a passagem de rotocanteirador para confecção dos canteiros. A adubação de plantio consistiu da aplicação de 20 kg ha⁻¹ de N, 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e de 200 kg ha⁻¹ de KCl, nas formas de sulfato de amônio, superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente. O alho foi plantado em 07/05/2018, em três fileiras duplas por canteiro, dispostas longitudinalmente, no espaçamento de 0,1 x 0,1 x 0,4 cm (entre bulbilhos na linha, entre linhas e entre as fileiras duplas). Em cada linha dupla de plantio, foram plantados 32

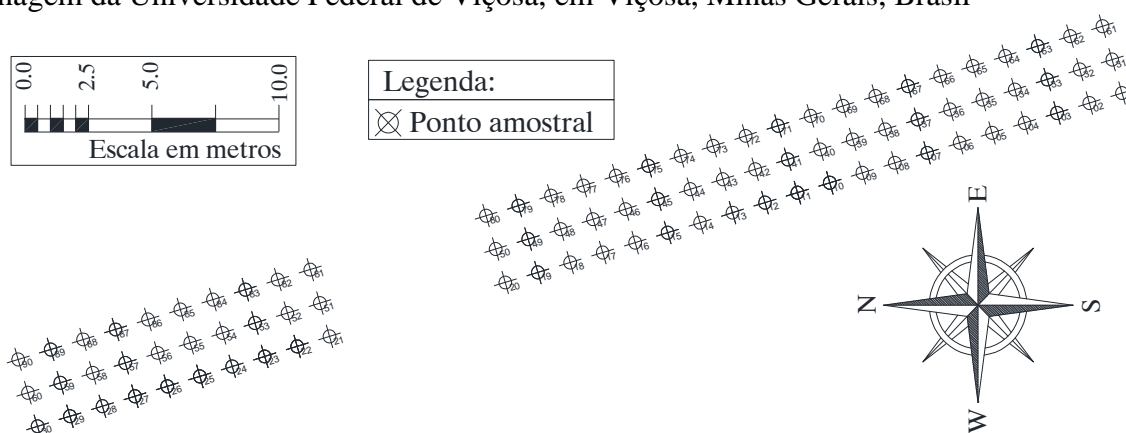
bulbilhos. Na coleta de dados, foram consideradas como úteis as duas linhas centrais, desprezando-se 0,3 m das extremidades.

A cultivar empregada foi a Ito, pertencente ao grupo dos alhos nobres, sendo uma das mais cultivadas na região do Alto Paranaíba-MG. Os “bulbos-semente” foram submetidos ao processo de vernalização em pré-plantio, em câmara fria a uma temperatura média de 4°C, por 50 dias. Os bulbilhos foram classificados em peneiras, sendo utilizados para plantio bulbilhos retidos na peneira 3 (malha de 8 x17 mm).

O experimento consistiu de três lâminas de irrigação (60%, 80% e 100% da capacidade de campo do solo) e de três lâminas de fertirrigação com nitrogênio (60%, 80% e 100% da dose recomendada), ambas aplicadas no período de diferenciação dos bulbilhos. As adubações de cobertura foram feitas via fertirrigação aos 8, 15, 22, 60, 70, 80 e 90 dias depois do plantio com 30 kg ha⁻¹ de N em cada aplicação e 20 kg ha⁻¹ de K na forma de adubo 30-00-20.

Os pontos amostrais foram dispostos em canteiros com 1,6 m de largura, 1,6 m de comprimento, e cada ponto ocupou uma área de 2,56 m². Foram definidas direções *x* e *y* do sistema de coordenadas cartesianas e feito o estaqueamento da malha experimental próximo ao final do ciclo do alho, isto é, no segundo decêndio de setembro/2018, espaçadas de 1,6 m entre elas. Cada malha experimental foi constituída de três transeções de 48 m x 1,6 m. Portanto, as transeções foram espaçadas de 1,6 m, com pontos amostrais esquadrejados em 1,6 m x 1,6 m, contendo 90 deles.

Figura 2 - Malha amostral e detalhamento da amostragem feita na Área de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil



Fonte: O autor.

Durante a condução do experimento as pragas e doenças foram controladas com pulverizações com produtos acaricidas e fungicidas. O controle das ervas daninhas foi efetuado com capina manual.

A irrigação do experimento foi feita por meio do sistema de irrigação por gotejamento, utilizando uma linha de distribuição no meio de uma linha dupla de plantio de alho, com gotejadores espaçados de 0,3 m. A determinação da intensidade de precipitação dos gotejadores instalados foi feita seguindo o método descrito por Bernardo (2006).

O monitoramento da necessidade hídrica da cultura durante a condução do experimento foi feito por um equipamento denominado Irrigâmetro, instalado dentro da área de plantio (OLIVEIRA, 2008). As leituras no Irrigâmetro foram feitas às 8h, diariamente, e as irrigações realizadas com turno de rega fixo, às terças-feiras e sextas-feiras de cada semana. A lâmina de água aplicada em cada irrigação foi a suficiente para repor o teor de umidade do solo para a capacidade de campo até o início dos tratamentos com déficit hídrico.

Aos 51 dias após o plantio, controlou-se a lâmina de água aplicada em todos os canteiros de modo que no início da instalação do período de déficit hídrico controlado a água no solo estivesse na capacidade de campo. Aos 82 dias após plantio, iniciou-se a irrigação com variação da lâmina e do nitrogênio. Foram, ao todo, 4 irrigações com variações, sendo elas feitas aos 82, 86, 101 e 107 dias após plantio.

A irrigação dos pontos (66 deles) que não estavam sendo submetidas ao déficit hídrico, ou seja, 100% da necessidade hídrica foi feita normalmente seguindo a determinação plena do Irrigâmetro. O restante dos pontos da malha (24 deles) foram divididos em número de 12 e irrigados com 80% e 60% da necessidade hídrica, respectivamente, até a última fase de desenvolvimento do alho. A última irrigação feita no experimento ocorreu 15 dias antes da colheita.

A colheita do experimento foi feita em 17/09/2018, aos 130 dias após o plantio, na fase de senescência das plantas, quando elas apresentavam em torno de seis folhas verdes. Depois de colhidas foram curadas ao sol por três dias e, posteriormente, curadas à sombra em galpão por 27 dias. Terminada a cura, foram feitas todas as análises necessárias. Os componentes de produção determinados foram, individualmente, coletados na área útil do ponto amostral, que era composto por uma linha dupla com 1,0 m de comprimento, totalizando 20 plantas.

A produtividade do alho (PR) foi determinada pesando a massa do bulbo (cabeça do alho), expressa em kg ha^{-1} . A irrigação (IR) com déficit aplicada na formação dos bulbilhos foi determinada mensurando a quantidade de água aplicada durante todo o ciclo da cultura,

em cada ponto amostral, sendo expressa em milímetros. O nitrogênio (NI) aplicado via fertirrigação com déficit na formação dos bulbilhos foi determinado mensurando a quantidade do nutriente aplicado após plantio da cultura, em cada ponto amostral, expresso em quilogramas. O superbrotamento foi obtido pela porcentagem de plantas superbrotadas, em cada ponto amostral. O diâmetro do bulbo (DB) e a altura do bulbo (AB) foram obtidos com uso de um paquímetro, expresso em milímetros. O índice de área foliar (IA) foi obtido, por intermédio do aparelho eletrônico PAR/LAI Ceptometer modelo CP – 80, próximo da colheita, expresso em %. O volume do bulbo foi calculado pela Equação 1, expresso em centímetro³.

$$V = 4\pi \frac{(DB)(AB)^2}{3} \quad (1)$$

Em que - V = volume do bulbo, em cm³; DB = diâmetro do bulbo, em milímetros e AB = altura do bulbo, em milímetros.

Para cada componente de produção estudado, foi feita a análise descritiva clássica com auxílio do programa estatístico Rbio (biometria no R) versão 17, tendo sido calculados a média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio-padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e feita a análise da distribuição de frequência dos dados. Desta forma, para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade dos índices fenológicos (x), foi utilizado o teste de Shapiro e Wilk (1965) a 5%.

Para caracterização da estrutura e da magnitude da dependência espacial dos índices fenológicos da planta do alho, foram feitos os ajustes de semivariograma e a estimativa da semivariância estimando os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma denominado de efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C), e o alcance (A_0). Após o ajuste dos semivariogramas, foi feita a interpolação dos dados por krigagem de forma a possibilitar a visualização dos padrões de distribuição espacial dos componentes produtivos do alho, por meio de mapas. Foram gerados mapas de erro-padrão da predição por krigagem. A validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas simples e cruzados, que legitima respectivamente a krigagem e a co-krigagem.

5.3 Resultados e discussão

Os dados referentes à análise descritiva dos índices fenológicos avaliados na planta de alho estão apresentados na Tabela 1. De acordo com Pimentel-Gomes e Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de variação (CV). Suas classes foram determinadas como baixa ($CV < 10\%$), média ($10\% < CV < 20\%$), alta ($20\% < CV < 30\%$) e muito alta ($CV > 30\%$). Portanto, a produtividade do

alho (PR), diâmetro do bulbo (DB), altura do bulbo (AB) e volume do bulbo (VB) apresentaram baixo coeficiente de variação. A interferência dos componentes externos, irrigação com déficit aplicada na formação dos bulbilhos (IR) e nitrogênio (NI) apresentaram médio coeficiente de variação. O índice de área foliar obteve alto coeficiente de variação e o superbrotamento (SU), muito alto coeficiente de variação. Viana et al. (2016), encontraram coeficiente de variação para PR do alho classificado como médio. Esse padrão é utilizado como indicativo de precisão experimental, de forma que, quanto menor o valor da sua estimativa maior terá sido sua precisão. Assim, constatou-se que, para a maioria dos caracteres avaliados (PR, IR, NI, DB, AB e VB), a precisão experimental é classificada como de alta a média. Para a variável cuja precisão experimental foi caracterizada como baixa (IA), em razão dos altos valores do CV, é importante destacar que essa classificação provavelmente se deve ao fato de o aparelho medidor ter sofrido influências externas, como forma de utilização e/ou a questão de calibração do equipamento. Já o índice de superbrotamento obteve precisão muito baixa, provavelmente por ser uma anomalia (distúrbio fisiológico) que pode ser causada por fatores genéticos, ambientais ou ambos. Entre os fatores ambientais, incluem-se a falta e/ou o excesso de fatores essenciais para o crescimento das plantas, tais como nutrientes, água e luz.

Tabela 1 - Estatística descritiva para os componentes produtivos da cultura do alho

Índice Fenológico	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
PR	10351,02	8370,36	12518,51	840,39	8,12	-0,11	-0,10	0,6587	NO
IR	194,91	129,40	225,68	22,40	11,49	1,05	-1,34	1×10^{-8}	IN
NI	1,81	1,30	2,13	0,22	12,32	-0,85	-0,72	2×10^{-7}	IN
SU	9,34	0,00	46,87	9,36	100,25	3,10	1,55	3×10^{-8}	IN
DB	49,23	45,87	53,18	1,58	3,20	-0,47	0,03	0,9225	NO
AB	39,42	36,86	43,11	1,14	2,89	0,30	0,23	0,8713	NO
VB	32,10	26,45	38,28	25,14	7,83	-0,21	0,03	0,4613	NO
IA	67,64	25,00	91,00	18,08	26,74	-1,03	-0,37	2×10^{-4}	IN

Produtividade do alho (PR), em kg ha^{-1} , interferência dos componentes externos, irrigação com déficit aplicada na formação dos bulbilhos (IR), em mm e nitrogênio (NI), em kg, superbrotamento (SU), em %, diâmetro do bulbo (DB), em mm, altura do bulbo (AB), em mm, volume do bulbo (VB) em cm^3 , índice de área foliar (IA), em %. CV = coeficiente de variação. Pr<w = valor do teste de probabilidade de Shapiro Wilk. DF = distribuição de frequência - NO, do tipo normal, IN, indeterminado.

Os índices fenológicos apresentaram coeficientes de assimetria positiva para SU, DB, AB e VB, com valores de 1,55; 0,03; 0,23 e 0,03, respectivamente, e negativa para PR, IR, NI e IA, com valores de -0,10; -1,34; -0,72 e -0,37, respectivamente. Já os coeficientes de curtose foram positivos para IR, SU e AB, com valores de 1,05; 3,10 e 0,30, respectivamente. Os

índices fenológicos PR, DB, AB e VB foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que suas respectivas probabilidades foram de 0,6587; 0,9225; 0,8713 e 0,4613, respectivamente. Resultados semelhantes para a produtividade em estudo com feijão mostraram distribuição de frequência do tipo normal (OLIVEIRA et al., 2018a).

A análise geoestatística, Tabela 2, mostrou dependência espacial para os semivariogramas dos índices fenológicos IR, NI e VB, que se ajustaram ao modelo esférico, enquanto PR, DB e IA se ajustaram ao modelo exponencial. Esse comportamento está em conformidade com Montanari et al. (2013), que afirmam que os modelos esféricos e exponenciais se apresentam como teóricos mais comuns aos atributos do solo e da planta. Os índices fenológicos SU e AB se ajustaram ao modelo gaussiano, que também é um modelo de ajuste muito utilizado para atributos da planta.

Tabela 2 - Parâmetros estimados para o semivariograma simples dos componentes produtivos da cultura do alho

Índice Fenológico ^(a)	Modelo ^(b)	Pepita C ₀	Patamar C ₀ +C	Alcance A ₀ (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação Cruzada		
							%	Classe	a	b	r
PR	exp	3,86x10 ⁶	7,72x10 ⁶	12,6	0,71	1,63x10 ¹⁰	50,0	Moderada	7367,80	0,60	0,35
IR	esf	2,08x10 ²	5,95x10 ²	14,3	0,50	5,81x10 ⁴	65,0	Moderada	-6,74	1,04	0,67
NI	esf	1,20x10 ⁻²	6,30x10 ⁻²	20,0	0,70	6,51x10 ⁻⁴	81,0	Forte	-0,10	1,06	0,83
SU	gau	5,31x10 ¹	1,33x10 ²	36,0	0,79	4,79x10 ³	60,0	Moderada	0,71	0,92	0,53
DB	exp	1,36	2,72	14,1	0,85	0,10	50,0	Moderada	30,14	0,39	0,14
AB	gau	0,95	1,50	8,5	0,80	6,70x10 ⁻²	36,7	Moderada	5,38	0,86	0,35
VB	esf	3,75x10 ²	6,96x10 ²	9,0	0,48	3,67x10 ⁴	46,1	Moderada	0,06	0,60	0,23
IA	exp	8,50x10 ⁻³	3,40x10 ⁻²	8,5	0,43	5,60x10 ⁻⁵	75,1	Forte	-0,08	1,12	0,45

(a) Produtividade do alho (PR), em kg ha⁻¹, interferência dos componentes externos, irrigação com déficit aplicada na formação dos bulbilhos (IRR), em mm e nitrogênio (NI), em kg, superbrotamento (SU), em %, diâmetro do bulbo (DB), em mm, altura do bulbo (AB), em mm, volume do bulbo (VB) em cm³, índice de área foliar (IA), em %. (b) esf = esférico, exp = exponencial, epp = efeito pepita puro e gau = gaussiano; (c) SQR = Soma do quadrado do resíduo; (d) ADE = avaliador da dependência espacial.

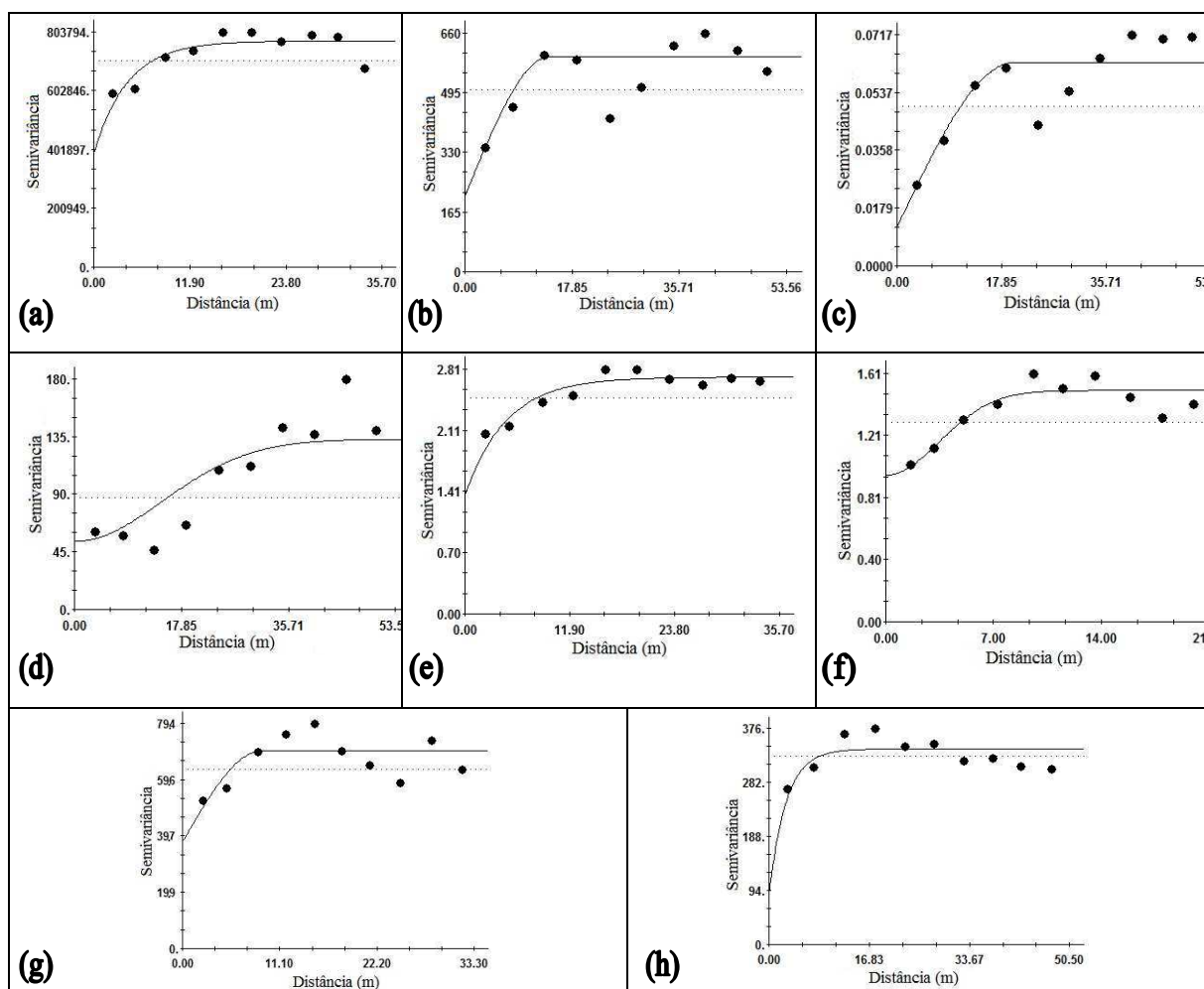
Pela classificação de Cambardella et al. (1994), são considerados como avaliação da dependência espacial (ADE) forte, os semivariogramas que têm um efeito pepita < 25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca > 75%. Com base nesta classificação, os valores das variáveis NI e IA apresentaram ADE forte. O fato de a variação do nitrogênio e do índice de área foliar ter apresentado forte correlação espacial, é um ótimo indicativo do potencial da técnica de krigagem na classificação de sítio. Já PR, IR, SU, DB, AB e VB apresentaram o ADE moderado. Estudando a variabilidade espacial dos índices fenológicos

da planta em feijão, Oliveira et al. (2018a) encontraram resultados diferentes, tendo produtividade da planta apresentado ADE forte.

Os menores valores para alcance foram PR (12,6 m), VB (9,0 m), AB (8,5 m) e IA (8,5 m) indicando que os pontos são mais semelhantes entre si num raio de até 12,6 m, já, para as demais variáveis, os raios aumentam na média para 21,1 m. Portanto, com base nos valores aqui encontrados, sugere-se que em trabalhos futuros os valores dos alcances devem ser empregados em pacotes geostatísticos de forma a fomentar os pacotes computacionais utilizados na agricultura de precisão.

A Figura 3 apresenta os semivariogramas, que determinam e exploram os padrões ou continuidades espaciais dos componentes de produção do alho e dos componentes externos.

Figura 3 - Semivariogramas dos componentes de produção da planta do alho, onde (a) Produtividade do alho (PR), em kg ha^{-1} , interferência dos componentes externos (b) irrigação com déficit aplicada na formação dos bulbilhos (IR), em mm e (c) nitrogênio (NI), em kg, (d) superbrotamento (SU), em %, (e) diâmetro do bulbo (DB), em mm, (f) altura do bulbo (AB), em mm, (g) volume do bulbo (VB) em cm^3 , (h) índice de área foliar (IA), em %

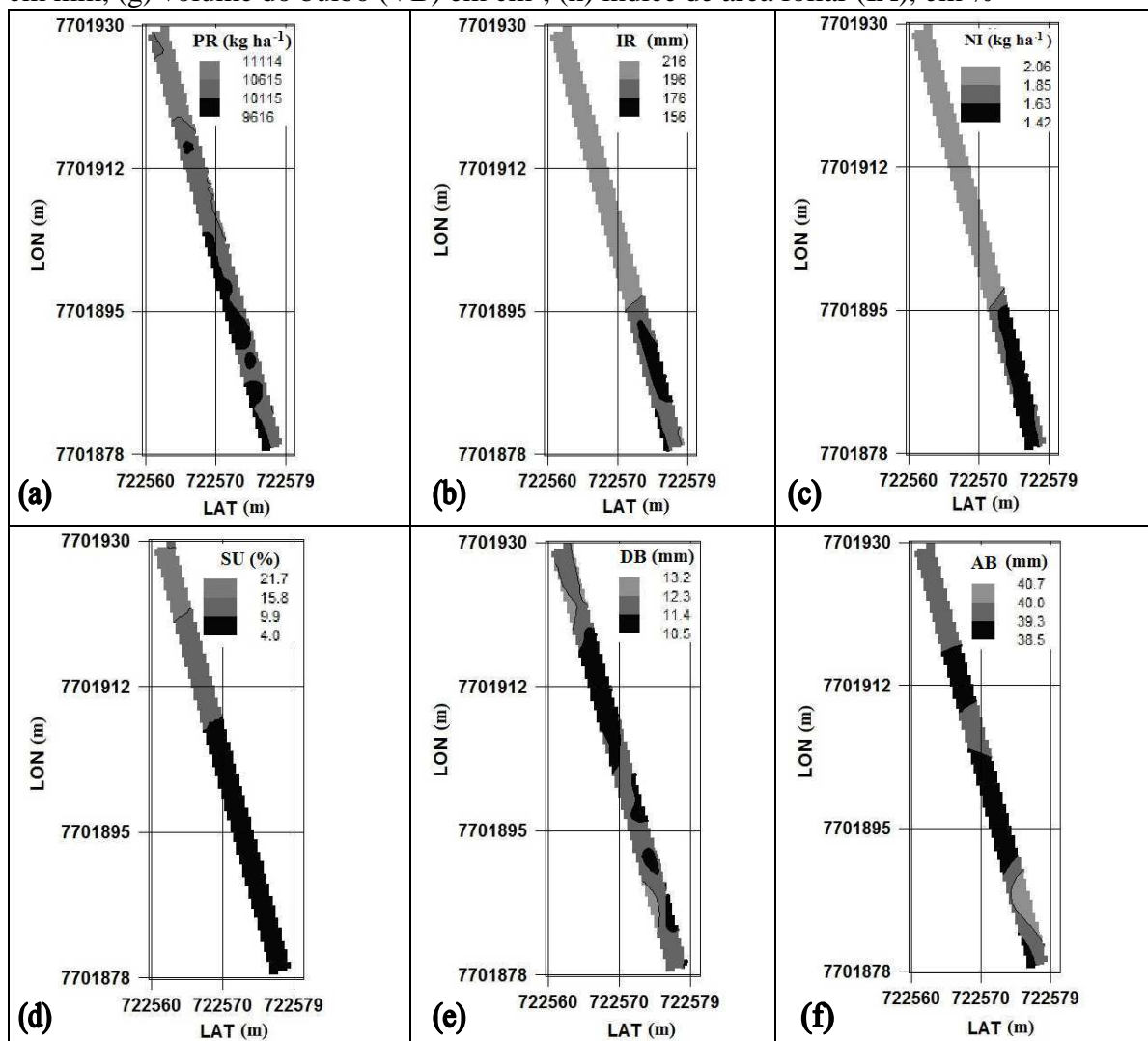


Fonte: O autor.

A Figura 4, apresenta os mapas de krigagens simples dos componentes de produção estudados, os quais permitem visualizar a variabilidade espacial na área.

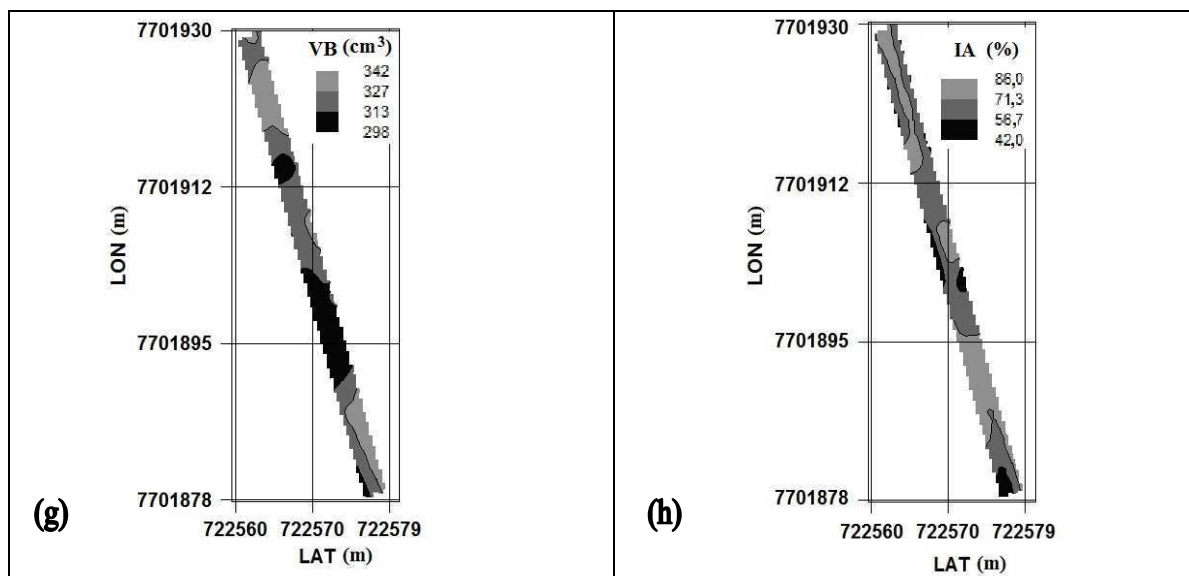
Ao analisar o mapa de variabilidade espacial da produtividade, Figura 4a, pode-se perceber que os pontos da região sul da área apresentaram as menores produtividades, enquanto os maiores valores de produtividade foram observados nos pontos da região norte da área.

Figura 4 - Mapas de krigagem simples dos componentes de produção da planta do alho: (a) Produtividade do alho (PR), em kg ha^{-1} , interferência dos componentes externos, (b) irrigação com déficit aplicada na formação dos bulbilhos (IR), em mm e (c) nitrogênio (NI), em kg, (d) superbrotamento (SU), em %, (e) diâmetro do bulbo (DB), em mm, (f) altura do bulbo (AB), em mm, (g) volume do bulbo (VB) em cm^3 , (h) índice de área foliar (IA), em %



Continua...

Continuação...



Fonte: O autor.

Observando o mapa de distribuição espacial da irrigação e do nitrogênio, Figuras 4b e 4c, verifica-se que nos pontos das partes norte e central estão as maiores aplicações tanto de água quanto de nitrogênio. Já nos pontos das partes inferiores do mapa (parte sul), verificam-se valores de aplicações menores, justamente nestes pontos é que ocorreram as variações com déficit nas aplicações das lâminas de irrigação e fertirrigação na cultura do alho, que resultaram em menores valores de produção.

No mapa de superbrotamento (SU), Figura 4d, pode-se verificar que ocorreram as menores porcentagens de SU nos pontos do sul da área. De antemão, já se pode fazer uma associação de mapas de krigagens em que nas regiões onde houve maiores percentuais de plantas com superbrotamento foram justamente aquelas onde se aplicaram maiores lâminas de irrigação e fertirrigação, bem como ocorreu maior produtividade. Como o inverso é verdadeiro, pode-se concluir que menores lâminas de água e menores doses de nitrogênio aplicadas na diferenciação dos bulbilhos implicam menores incidências de superbrotamento no alho, bem como menor produtividade da cultura.

Pelos mapas de krigagens referentes ao diâmetro do bulbo, altura do bulbo e volume do bulbo, Figuras 4e, 4f e 4g, respectivamente, verifica-se que menores valores ocorreram em pontos nas regiões centrais e sul do mapa, justamente onde foram aplicadas menores lâminas de irrigação e fertirrigação, bem como onde ocorreu menor produtividade. Estes componentes de produção relacionados aos bulbos são extremamente importantes para o produtor, pois o

tamanho do bulbo se reflete na classificação, que é feita com base no diâmetro do bulbo, sendo que bulbos maiores apresentam maior valor de comercialização.

Portanto, estas características são intimamente relacionadas ao manejo imposto à lavoura, em especial a irrigação e adubação nitrogenada. Desta forma, a identificação da variabilidade espacial destes componentes de produção e seus consequentes mapeamentos podem colaborar com os produtores na identificação de distorções que estão ocorrendo em campo de forma a possibilitar sua correção. A portaria No 242/92 do Ministério da Agricultura normatiza que o alho deve apresentar, entre outras características, a classificação por diâmetro do bulbo nas seguintes classes: classe 3, mais de 32 até 37 mm; classe 4, mais 37 até 42 mm; classe 5, mais de 42 até 47 mm; classe 6, mais de 47 até 56 mm e classe 7, mais de 56 mm. No presente trabalho, os bulbos foram enquadrados na classe 6. O mercado consumidor de alho prefere bulbos de tamanho maior e com pequeno número de bulbilhos por bulbo, fato importante para a comercialização, quando bulbos com estas características alcançam as cotações mais elevadas (RESENDE, 1997).

O mapa de índice de área foliar (IA), Figura 4h, apresenta poucos pontos com valores menores que 56,7%, os quais ficaram localizados nas partes central e sul do mapa, justamente onde se verificou menor produtividade. Segundo Oliveira et al., (2018b), entre todas os componentes produtivos avaliados no alho, a área foliar aos 87 DAP, e a duração da área foliar no período de 87 a 114 DAP, foram as características morfofisiológicas que mais influenciaram na produtividade de bulbos de acessos de alho 'Amarante'. A falta de resposta mais contundente referente à IA no presente trabalho pode ser atribuída ao estágio avançado da cultura em que foram feitas as leituras, quando as plantas já apresentavam grande percentagem da área foliar senescida.

A Tabela 3, apresenta os parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens da produtividade do alho e dos índices fenológicos da planta. A relação crescente dessas validações, analisada pela grandeza do coeficiente de correlação (r), foi a seguinte: DB (0,14) > VB (0,23) > AB (0,35) > PR (0,35) > IA (0,45) > SU (0,53) > IR (0,67) e > NI (0,83). Os coeficientes angulares (b) das validações cruzadas variaram entre 1,12 (IA) e 0,60 (VB).

Quando feito o semivariograma cruzado entre os índices fenológicos da planta, correlações espaciais positivas, Tabela 3, para a PR = f(AB), PR = f(DB), DB = f(AB), SU = f(PR), SU = f(IR), DB = f(IR), SU = f(NI), DB = f(NI), foram encontrados valores de ADE de 34,7; 31,4; 50,0; 100,0; 89,1; 95,0; 78,4 e 99,9%, respectivamente. Estes resultados mostram relação direta entre a produtividade, altura e o diâmetro do bulbo e que o aumento do diâmetro do bulbo implica aumento da produtividade, assim como a porcentagem de

superbrotamento aumenta com a produtividade do alho. Outra observação importante diz respeito à relação direta observada entre o superbrotamento e a irrigação e o nitrogênio, sendo que o aumento da lâmina de irrigação e da fertirrigação na fase de formação dos bulbilhos implica maiores porcentagens de plantas superbrotadas.

Correlações espaciais negativas foram obtidas para $AB = f(IR)$, $VB = f(IR)$, $AB = f(NI)$ e $VB = f(NI)$, com valores de ADE de 86,7; 97,9; 80,0 e 97,1 respectivamente. Ao analisar estes índices, conclui-se que o aumento da irrigação e da fertirrigação na fase de formação dos bulbilhos implicam menores volumes de bulbos. Tais resultados serão muito úteis para produtores de alho, pois, com redução da irrigação e fertirrigação na fase de formação (diferenciação) dos bulbilhos, o produtor terá bulbos maiores e incidência menor de superbrotamento no alho.

Tabela 3 - Parâmetros estimados para o semivariograma cruzado dos componentes produtivos da cultura do alho

Índice Fenológico ^(a)	Modelo ^(b)	Pepita Co	Patamar Co+C	Alcance Ao (m)	r^2	SQR ^(c)	ADE ^(d)	
							%	Classe
PR = f(AB)	gau	$4,59 \times 10^2$	$7,03 \times 10^2$	11,4	0,781	$1,48 \times 10^4$	34,7	Moderada
PR = f(DB)	gau	$9,78 \times 10^2$	$1,43 \times 10^3$	17,0	0,896	$3,42 \times 10^4$	31,4	Moderada
DB = f(AB)	esf	0,55	1,10	16,3	0,777	$6,00 \times 10^{-2}$	50,0	Moderada
SU = f(PR)	gau	1,00	$2,35 \times 10^3$	32,0	0,874	$3,19 \times 10^6$	100,0	Forte
SU = f(IR)	exp	5,00	$4,59 \times 10^1$	4,6	0,833	$5,21 \times 10^1$	89,1	Forte
AB = f(IR)	gau	-0,91	-6,85	11,6	0,885	$5,03 \times 10^0$	86,7	Forte
DB = f(IR)	gau	1,00	$1,90 \times 10^1$	37,0	0,706	$3,12 \times 10^2$	95,0	Forte
VB = f(IR)	gau	-0,09	-8,50	11,6	0,794	$3,73 \times 10^1$	97,9	Forte
SU = f(NI)	exp	0,08	0,37	13,0	0,855	$5,36 \times 10^{-3}$	78,4	Forte
AB = f(NI)	gau	-0,02	$-8,50 \times 10^{-2}$	16,0	0,943	$3,97 \times 10^{-4}$	80,0	Forte
DB = f(NI)	gau	$1, \times 10^{-4}$	0,16	37,0	0,700	$2,43 \times 10^{-2}$	99,9	Forte
VB = f(NI)	esf	$-4,00 \times 10^{-3}$	-0,14	20,3	0,868	$2,90 \times 10^{-3}$	97,1	Forte

(a) PR = produtividade do alho, em função $f(AB)$ = altura do bulbo e $f(DB)$ = diâmetro do bulbo; DB = diâmetro do bulbo, em função $f(AB)$ = altura do bulbo; SU = superbrotamento, em função $f(PR)$ = produtividade do alho, $f(IR)$ = Irrigação com déficit na formação dos bulbilhos e $f(NI)$ = nitrogênio com déficit na formação dos bulbilhos; AB = altura do bulbo, em função $f(IR)$ = Irrigação com déficit na formação dos bulbilhos e $f(NI)$ = nitrogênio com déficit na formação dos bulbilhos; DB = diâmetro do bulbo, em função $f(IR)$ = Irrigação com déficit na formação dos bulbilhos e $f(NI)$ = nitrogênio com déficit na formação dos bulbilhos; VB = volume do bulbo, em função $f(IR)$ = Irrigação com déficit na formação dos bulbilhos e $f(NI)$ = nitrogênio com déficit na formação dos bulbilhos. (b) esf = esférico, exp = exponencial e gau = Gaussiano; (c) SQR = Soma do quadrado do resíduo; (d) ADE = avaliador da dependência espacial.

No ajuste dos modelos dos semivariogramas cruzados, foram tidos com o modelo esféricos: $DB = f(AB)$ e $VB = f(NI)$, como modelos gaussianos: $PR = f(AB)$, $PR = f(DB)$, SU

= f(PR), AB = f(IR), DB = f (IR), VB = f(IR), AB = f(NI) e DB = f(NI) e como modelos exponenciais: SU = f(IR) e SU = f(NI).

O coeficiente de determinação espacial (r^2) foi: PR=f(AB) 0,781, PR=f(DB) 0,896, DB=f(AB) 0,777, SU=f(PR) 0,874, SU=f(IR) 0,833, AB=f(IR) 0,885, DB=f (IR) 0,706, VB=f(IR) 0,794, SU=f(NI) 0,855, AB=f(NI) 0,943, DB=f(NI) 0,700 e VB=f(NI) 0,868, todos superiores a 0,700, indicando uma determinação espacial significativa dos dados. Já a relação da grandeza do alcance (A_o) foi: PR=f(AB) 11,4, PR=f(DB) 17,0, DB=f(AB) 16,3, SU=f(PR) 32,0, SU=f(IR) 4,6, AB=f(IR) 11,6, DB=f (IR) 37,0, VB=f(IR) 11,6, SU=f(NI) 13,0, AB=f(NI) 16,0, DB=f(NI) 37,0 e VB=f(NI) 20,3 m, indicando que os pontos são mais semelhantes entre si num raio de até 37 m.

5.4 Conclusão

A produtividade tem correlação direta com a altura e o diâmetro do bulbo.

O superbrotamento tem correlação direta com a produtividade.

Lâminas de água e doses de nitrogênio aplicadas na fase de diferenciação dos bulbilhos têm relação direta com superbrotamento em alho.

5.5 Referências

BERNARDO, S., SOARES, A. A., & MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8º. Ed. Editora UFV, Viçosa-MG. 2006.

BREWSTER, J. L. Onions and other vegetable alliums (Vol. 15). **CABI**. 2008.

BREWSTER, J. L. & RABINOWITCH, H. D. Onion and allied crops: Biochemistry, food science and minor crops (Vol. III). CRC Press, 2000. 265p.

CAMBARDELLA, C. A. MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E.. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CHAI, Q.; GAN, Y.; ZHAO, C.; XU, H. L.; WASKOM, R. M.; NIU, Y.; SIDDIQUE, K. H. M. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 1, p. 1–21, 2016.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FERRAZ, G. A. S. SILVA, F. M., CARVALHO, L. C. C., ALVES, M. C., FRANCO, B. C. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 140-150, 2012.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Statistical Pocketbook: **World food and agriculture**. 236 p, Rome, 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola** - LSPA. Novembro 2018. Brasília. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura>> acesso em 28/12/2018.

MONTANARI R., CARVALHO, M. P., FILHO, M. C. M. T., DALCHIAVON, F. C. Produção de matéria seca da braquiária de acordo com os atributos químicos de um Latossolo em Selvíria, Mato Grosso do Sul. **Revista. Ceres**, Viçosa, v. 60, n.6, p. 772-784, nov/dez, 2013.

MONTANARI R., PANACHUKI, E., LOVERA, L. H., CORREA, A. R., OLIVEIRA, I. S., QUEIROZ, H. A., TOMAZ, P. K. Variabilidade Espacial da Produtividade de Sorgo e de Atributos do Solo na Região do Ecótono Cerrado-Pantanal, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39:385-396, 2015.

OLIVEIRA, R. A.; RAMOS, M. M. **Manual do irrigâmetro**. Viçosa, MG: UFV, 144 p. 2008.

OLIVEIRA, J. T., DE PASSOS, M., ROQUE, C. G., BAIIO, F. H. R., KAMIMURA, K. M., DA SILVA RIBEIRO, I., & TEODORO, P. E. Space variability of phenological indicators of common bean crop. **Bioscience Journal**, 34(2). 2018a.

OLIVEIRA, N. L. C., PUIATTI, M., FINGER, F. L., FONTES, P. C. R., CECON, P. R., & MOREIRA, R. A. Ecofisiologia de acessos de alho 'Amarante'. **Ceres**, 10(1). 2018b.

PIMENTEL-GOMES, F. P., GARCIA, C. H. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais. Piracicaba, **FEALQ**. 309p. 2002.

PUIATTI, M. Exigências climáticas e ecofisiologia do alho. In: Nick, C. e Borém, A. (Ed.). **Alho: do plantio à colheita**: Viçosa-MG: Editora UFV, 2017.

RESENDE, G.M. de. Desempenho de cultivares de alho no Norte de Minas Gerais. **Horticultura Brasileira**, v.15, p.127-130, 1997.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika, London**, v.52, p.591-611, 1965.

SOUZA, R.J. DE; CASALI, V.W.D. Pseudoperfilhamento: uma anormalidade genético-fisiológica em alho. **Informe Agropecuário**, v.12, p.36-41, 1986.

SOUZA, R.J.; PAULA, M.B.; CECÍLIO FILHO, A.B. ALHO. IN: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ VENEGAS, V.H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, p.178. 1999.

VIANA, J. P. G., DE JESÚS PIRES, C., PINHEIRO, J. B., DOS SANTOS VALENTE, S. E., DE ALMEIDA LOPES, Â. C., & GOMES, R. L. F. Divergência genética em germoplasma de alho. **Ciência Rural**, 46(2), 203-209. 2016.

6 CAPÍTULO 3 - Contribuição de variáveis morfológicas para a produtividade de alho

Resumo

Originário da Ásia Central, o alho é uma cultura hortícola consumida mundialmente por seu sabor e propriedades nutracêuticas. Este trabalho teve como objetivo investigar a relação direta e indireta dos índices fenológicos sobre a produtividade do alho. Este trabalho foi conduzido em 2018 em um Latossolo Vermelho Amarelo no município de Viçosa, MG. As variáveis avaliadas foram produtividade do alho, com os seus componentes primários massa total, comprimento do pendão floral, comprimento da folha, largura da folha, massa seca, diâmetro do pseudocaule, número de bulbilhos, massa de bulbilhos, raiz, diâmetro do bulbo, altura do bulbo, superbrotamento e interferência do componente externo, irrigação com déficit aplicado na formação dos bulbilhos. Inicialmente, foi estimada a correlação de Pearson entre estes índices fenológicos, e a rede de correlações foi utilizada para expressar graficamente os resultados obtidos. Foi feito diagnóstico de multicolinearidade e constatado o número de condição de 789. Em seguida, foi feita a análise de trilha, considerando a produtividade como variável dependente principal. Os componentes primários da produtividade do alho, massa de bulbilhos, número de bulbilhos, seguido do diâmetro do bulbo e altura do bulbo, são as variáveis diretamente relacionadas com a produtividade do alho. O comprimento da folha e o superbrotamento demonstraram correlação negativa com a produtividade do alho. Este último índice fenológico apresentou correlação negativa com a quantidade de bulbilhos e de raiz. A irrigação com déficit, aplicada no estágio de formação dos bulbilhos, apresentou correlação positiva com a produtividade do alho e ligeiramente negativa com massa seca, altura do bulbo e superbrotamento.

Palavras-chave: Análise de trilha. Irrigação de precisão. *Allium sativum* L.

Abstract

Contribution of morphological traits for grain production in garlic

Originally from Central Asia, garlic is a horticultural crop consumed worldwide for its nutraceutical flavor and properties. The objective of this work was to investigate the direct and indirect relation of the phenological indices on the productivity of garlic. In the year 2018, this work was conducted in Yellow Red Latosol in the municipality of Viçosa, MG. The evaluated characteristics were garlic productivity, with its primary components, total mass, Floral stem length, leaf length, leaf width, dry mass, diameter of pseudocaule, number of bulbs, bulb mass, root, diameter bulb, bulb height, Sprouting bulb, and external component interference, irrigation with applied bulb formation deficiency. Initially, the Pearson correlation between these phenological indices was estimated and the correlation network was used to graphically express the results obtained. The analyzes of these data through statistical techniques of multicollinearity diagnosis, and a condition number of 789 was found. Followed by path analysis, allowed us to verify that among the primary components of garlic yield, bulb mass, number of bulbs, bulb diameter and bulb height, are the phenological indices of greater potential for selection and identification of superior genotypes for yield of garlic. Leaf phenology and leaf length indexes showed a negative correlation with garlic productivity. This last phenological index had a negative correlation with the number of bulbs and root amount. The irrigation with deficit, applied at the bulb formation stage, showed a positive

correlation with the garlic yield and slightly negative with dry mass, bulb height and Sprouting bulb.

Keywords: Track analysis. Precision irrigation. *Allium sativum* L.

6.1 Introdução

Originário da Ásia Central, o alho é uma cultura hortícola condimentar consumida mundialmente por seu sabor e propriedades nutracêuticas. A produção global anual de alho em 2015 e 2016 foi de 26 a 27 milhões toneladas, cultivadas, em aproximadamente um milhão e meio de hectares em vários países, com diferentes climas (FAOSTAT, 2018).

A água é o fator que mais frequentemente afeta o desenvolvimento, a produção e a qualidade do alho. A deficiência de água no solo compromete principalmente o desenvolvimento das plantas e a produtividade de bulbos, enquanto seu excesso prejudica a qualidade e a conservação (COSTA et al., 1993). Como o alho é cultivado preferencialmente na estação fria, coincidindo com a época mais seca do ano nas principais regiões produtoras no Brasil, a irrigação é prática obrigatória para suprir as necessidades hídricas da cultura e garantir a obtenção de elevada produtividade.

O alvo da produção de alho é alto rendimento e alta qualidade de bulbos. A obtenção de tais características é o resultado final de muitos processos de crescimento e desenvolvimento. Princípios bem estabelecidos definem o rendimento de uma colheita que é determinada por vários fatores como a quantidade folhas para maior absorção de luz, matéria seca que pode ser colhida e está sendo produzida, a proporção de irrigação aplicada e transferida para a fração colhida da planta etc.

A estimativa das correlações entre as variáveis é uma técnica amplamente utilizada para descobrir como incrementar a produtividade na maioria das culturas. Contudo, a correlação entre duas variáveis pode ser influenciada por uma terceira variável, ou um grupo de variáveis. Para remover o efeito destas outras variáveis a análise de trilha é a técnica mais indicada, por permitir desdobrar o coeficiente de correlação entre duas variáveis em efeitos diretos e indiretos. A variável a ser utilizada como critério de seleção indireta deve ter alta correlação com a variável dependente principal, efeito direto alto e no mesmo sentido da correlação, além de ser mais fácil de mensurar (CRUZ et al., 2012).

A análise de trilha tem sido utilizada para fins de melhoramento em diversas culturas de importância econômica como algodão, FARIAS et al., (2016); sorgo, SILVA et al.,

(2017a); cana, SILVA et al., (2017b); soja, TEODORO et al., (2015); milho, TEODORO et al., (2014) e feijão, OLIVEIRA et al., (2018). Assim, nosso objetivo foi investigar a relação entre variáveis morfológicas e a produtividade alho, visando a indicar critérios para a seleção direta e estudar os efeitos da irrigação com déficit aplicado no estágio de formação dos bulbilhos.

6.2 Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido na Área de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil, nas proximidades das coordenadas geográficas: 23 K, 722569.09 m E; 7701897.59 m S (UTM) (Figura1). De acordo com a classificação de Köppen e Geiger, o clima é caracterizado como Cwa. A temperatura média em Viçosa é de 20.6 °C. O verão tem muito mais pluviosidade que o inverno e 1229 mm é a pluviosidade média anual.

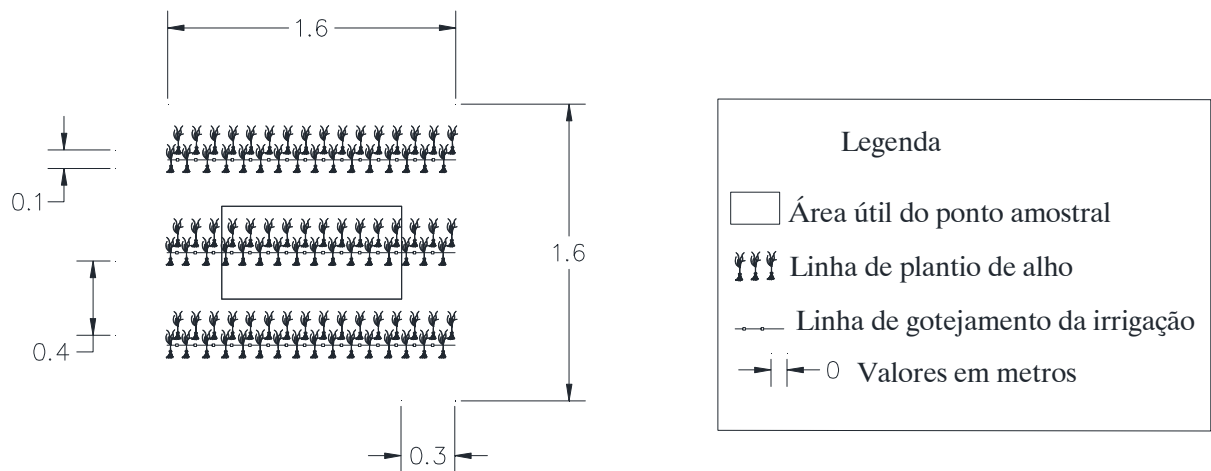
O solo no qual as malhas experimentais foram instaladas é classificado, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, como um Latossolo Vermelho Amarelo argilo-arenoso. A Tabela 1 mostra os valores das análises físicas e químicas.

Tabela 1 - Análises físicas e químicas do Latossolo Vermelho Amarelo da área do estudo

Camada m	Composição			Análise química											
	areia%.....	silte%.....	argila%.....	pH H ₂ O	Pmg dm ⁻³	K ⁺dag.kg ⁻¹	MOdag.kg ⁻¹	Ca ⁺²cmol _c dm ⁻³	Mg ⁺²cmol _c dm ⁻³	H ⁺ +Al ⁺³cmol _c dm ⁻³	Al ⁺³cmol _c dm ⁻³	SB	CTC	V% %	m% %
0 - 0,20	46,0	15,0	39,0	6,0	21,2	135,0	2,2	2,3	1,0	2,5	0,0	3,7	6,1	60,0	0,0

Na área de condução da lavoura, com sistema de plantio convencional em área irrigada, foram feitas aração e gradagem e passada a enxada rotativa para confecção dos canteiros para plantio do alho. Em 07/05/2018, foi plantada a variedade Ito de alho nobre roxo. Cada ponto amostral foi constituído por um canteiro com 1,60 m de largura e 1,60 m de comprimento, totalizando uma área de 2,56 m², sendo 3 linhas duplas de alho, e a área útil foi composta pela linha central, tendo as adjacentes como bordadura. As extremidades (0,30 m) da linha central também foram desconsideradas para fins de avaliação, sendo utilizadas como bordadura. Como pode ser visto na Figura 1, o espaçamento entre as linhas duplas de 0,40 m e 0,10 m entre as linhas da linha dupla (MAROUELLI et al., 2014).

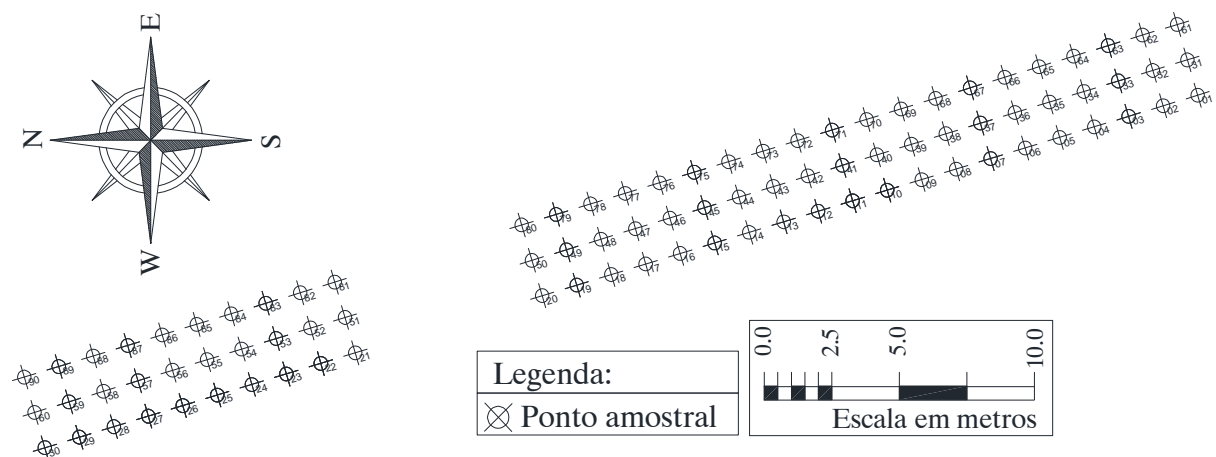
Figura 1 - Croqui do canteiro de plantio, representando um ponto amostral



Fonte: O autor.

Foram definidas direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas e feito o estaqueamento da malha experimental próximo ao final do ciclo do alho, isto é, no segundo decêndio de setembro/2018, espaçadas de 1,60 m entre elas. Cada malha experimental foi constituída de três transeções de 48,00 m x 1,60 m, tendo as transeções sido espaçadas de 1,60 m, com 90 pontos amostrais esquadrejados em 1,60 m x 1,60 m (Figura 2).

Figura 2 - Malha amostral e detalhamento da amostragem feita na Área de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil



Fonte: O autor.

As variáveis estudadas foram individualmente coletadas na área útil do ponto amostral, que era composto por 1 linha dupla com 1,00 m de comprimento, totalizando 20 plantas. A etapa laboratorial das análises foi feita entre os meses de outubro e novembro de 2018.

A irrigação (IRR) com déficit aplicada na formação dos bulbilhos foi determinada mensurando a quantidade de água aplicada durante todo o ciclo da cultura, expresso em milímetro. Para realizar o monitoramento da necessidade hídrica da cultura durante a condução do experimento, foi instalado dentro da área de plantio um aparelho denominado Irrigâmetro (OLIVEIRA, 2008).

Para expressar graficamente a relação funcional entre as estimativas de correlação entre os traços, foi utilizada uma rede de correlação, cuja proximidade entre os nós (traços) foi proporcional ao valor absoluto entre sua correlação. A espessura das bordas foi controlada aplicando um valor de corte de 0,50, o que significava que apenas $|r_{ij}| \geq 0,50$ tiveram as margens destacadas. Finalmente, as correlações positivas foram representadas em verde, enquanto as correlações negativas, em vermelho.

Posteriormente, foram feitas duas análises de trilha: (a) as primeiras análises consideraram YIE como a principal variável dependente (Y); e (b) as segundas análises consideraram o modelo descrito na Equação 1 e Figura 3:

$$Y = \sum_{n=1}^{\infty} (p_n X_n) \quad (1)$$

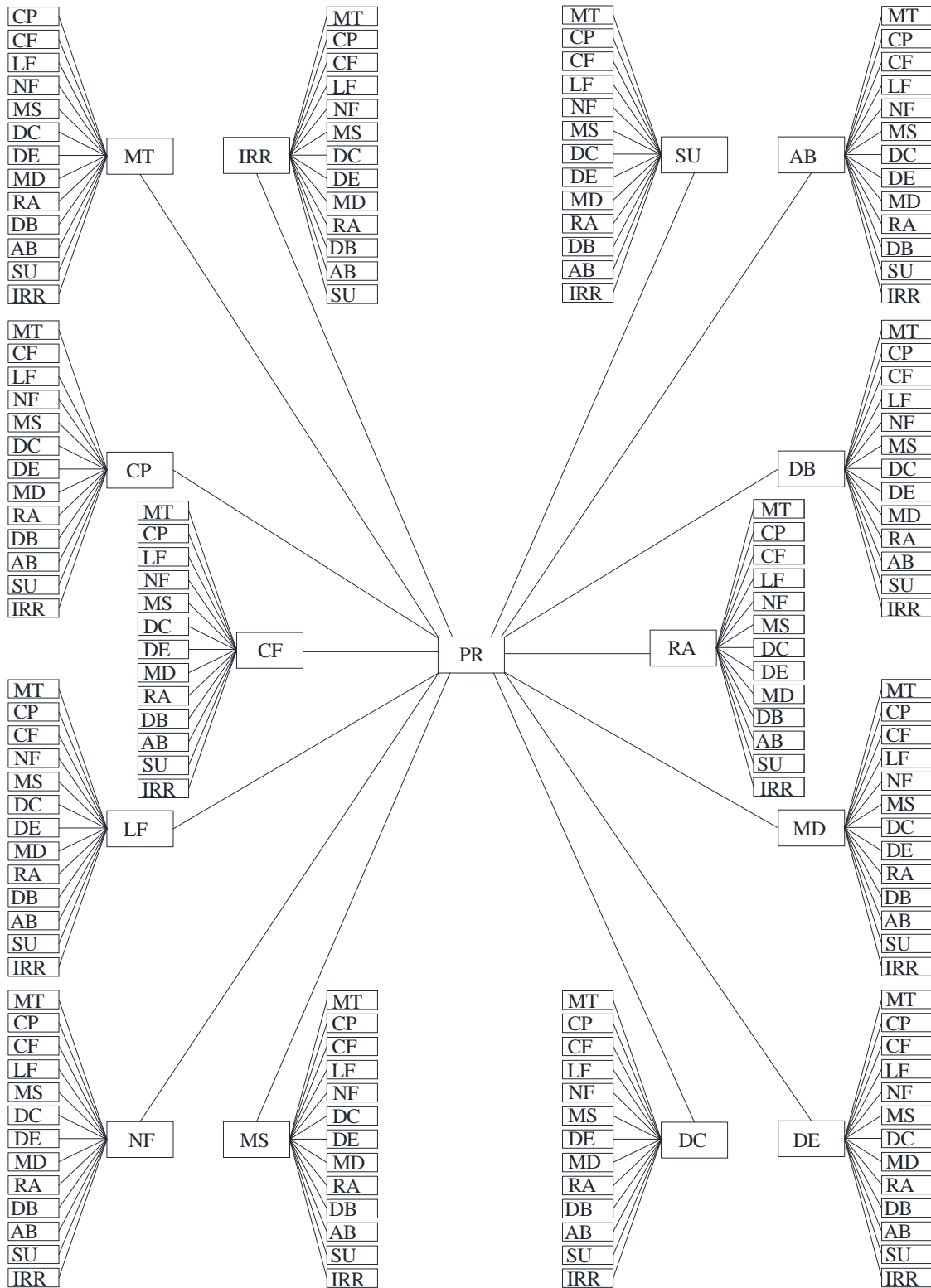
Em que - Y é a principal variável dependente (PR); X1, X2,..., xn são as variáveis explicativas independentes; e p1, p2,..., pn são os coeficientes de análise de trilha. O coeficiente de determinação (R^2) foi calculado pela Equação 2:

$$R^2 = p_1 y^2 + p_2 y^2 + \dots + p_n y^2 \quad (2)$$

Cruz e Carneiro (2012) afirmam que ignorar os efeitos da multicolinearidade pode provocar resultados danosos. Para tal, diagnósticos de multicolinearidade devem ser feitos de forma a viabilizar certos estudos. Neste sentido, o grau de multicolinearidade da matriz X'X foi estabelecido com base em seu número de condições (NC), que é a relação entre o autovalor maior e menor da matriz (MONTGOMERY et al., 2012). Se $NC > 1000$, a multicolinearidade é considerada grave; e se $100 \leq NC \leq 1000$, a multicolinearidade é considerada moderada a forte; e se $NC < 100$, a multicolinearidade é considerada fraca e não representa problema para a análise. Todas as análises estatísticas foram feitas com o software GENES (CRUZ, 2013).

A Figura 3 apresenta um diagrama de cadeia causal que mostra a relação dos traços morfológicos da produtividade do alho (PR), com os seus componentes primários, massa total (MT), comprimento do pendão floral (CP), comprimento da folha (CF), largura da folha (LF), massa seca (MS), diâmetro do pseudocaule (DC), número de bulbilhos (dentes) (DE), massa de bulbilhos (dentes) (MD), raiz (RA), diâmetro do bulbo (DB), altura do bulbo (AB) superbrotamento do alho (SU), e a interferência do componente externo, irrigação com déficit aplicado na formação dos bulbilhos (IRR), da análise de trilha realizada.

Figura 3 - Diagrama de cadeia causal que mostra a relação dos traços morfológicos da produtividade do alho (PR), com os seus componentes primários e o componente externo irrigação com déficit, aplicado na formação dos bulbilhos (IRR), da análise de trilha realizada

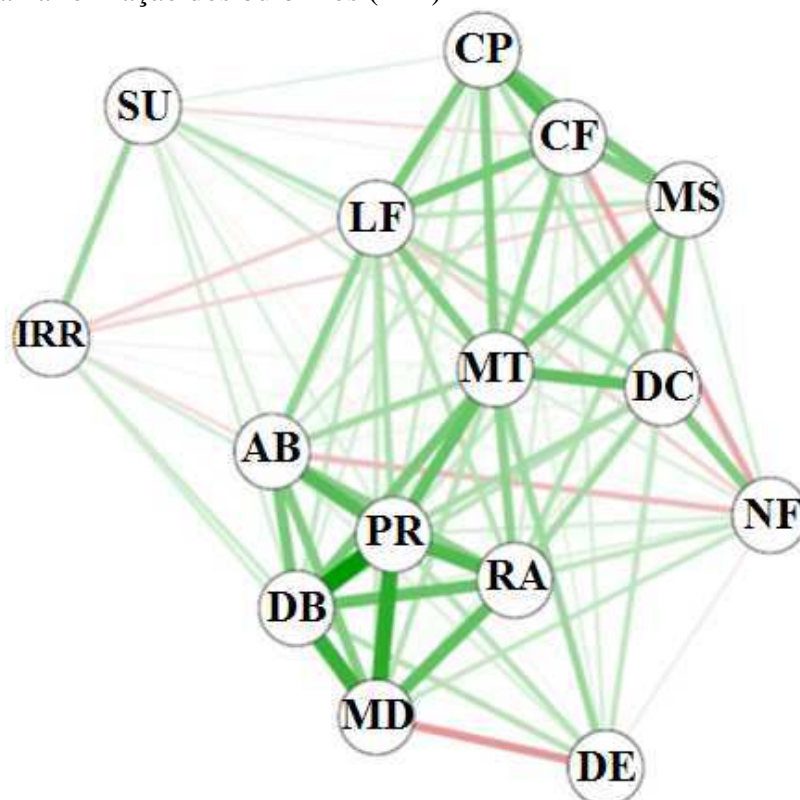


Fonte: O autor.

6.3 Resultados e discussão

A Figura 4 expressa a rede de correlações de Pearson entre as variáveis morfológicas: irrigação com déficit e produtividade do alho. Trata-se de uma técnica moderna que já foi utilizada por Silva et al. (2017a, b) e Oliveira et al (2018). As estimativas das correlações obtidas oscilaram entre -0,37905 a 0,9360. Houve correlação alta e positiva entre as variáveis diâmetro do bulbo (cabeça) e massa de bulbilhos (dentes) de alho. Além disto, estas variáveis apresentaram alta correlação com a produtividade do alho. Resultados similares foram obtidos em outros trabalhos com a cultura do alho. Castelhanos (2004) e Babaleshwar (2017), estudando a correlação entre produtividade de alho, tamanho de bulbilhos e diâmetro do bulbo, também encontraram correlações altas e positivas entre as mesmas variáveis.

Figura 4 - Rede de correlações das variáveis morfológicas: produtividade do alho (PR), com os seus componentes primários, massa total (MT), comprimento do pendão (CP), comprimento da folha (CF), largura da folha (LF), massa seca (MS), diâmetro do pseudocaule (DC), número bulbilhos (DE), massa de bulbilhos (MD), raiz (RA), diâmetro do bulbo (DB), altura do bulbo (AB), superbrotamento (SU), e interferência do componente externo, irrigação com déficit aplicada na formação dos bulbilhos (IRR)



Fonte: O autor.

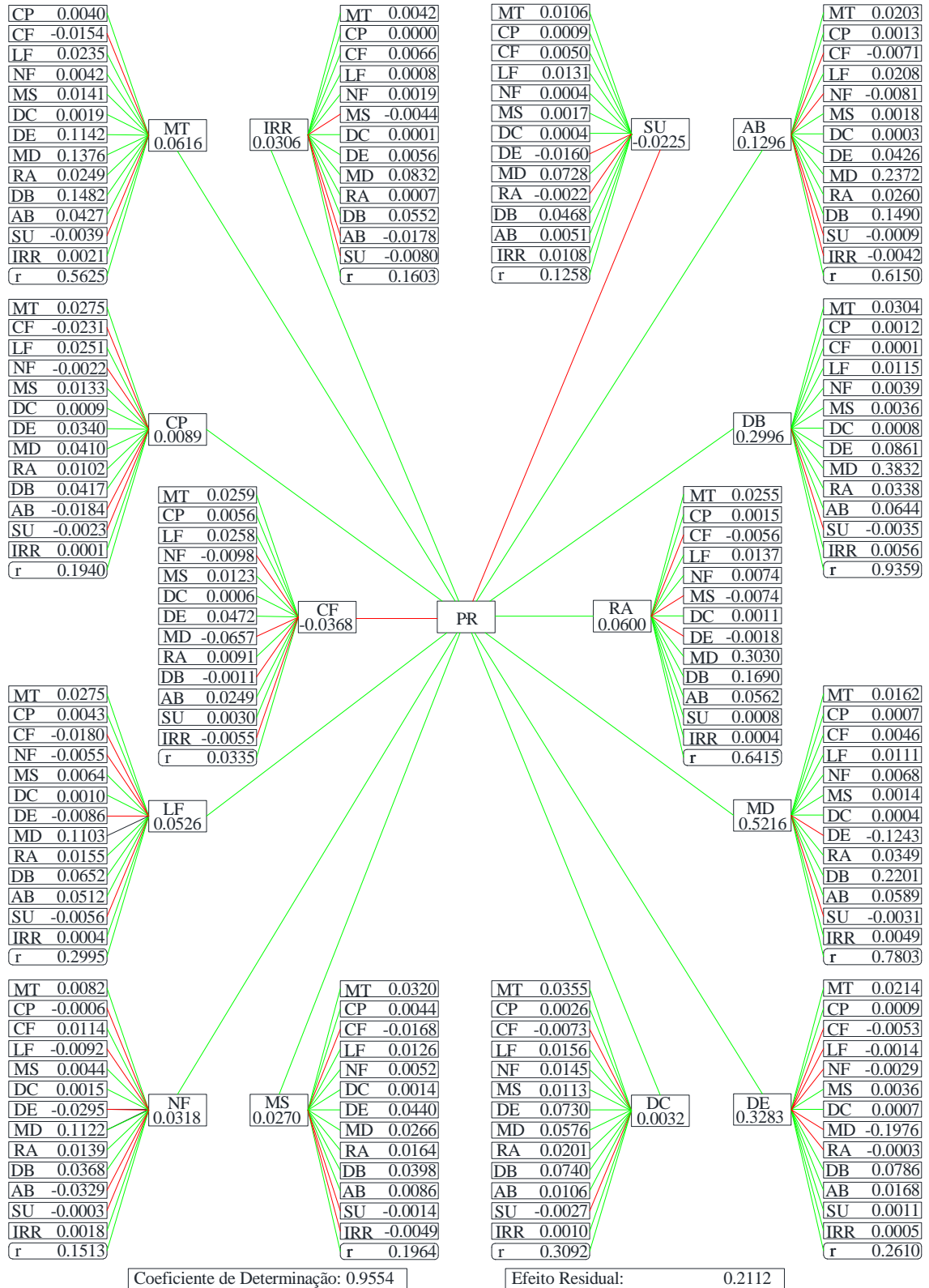
As combinações lineares muitas vezes são utilizadas erroneamente como sinônimo de uma correlação alta ou perfeita (próxima de +1 ou -1) entre as variáveis independentes (alto grau de multicolinearidade), especialmente quando ocorre uma sobreposição entre as variáveis no modelo de regressão. Seus efeitos danosos não são ocasionados simplesmente pela sua presença, mas sim pelo grau com que se manifestam. Entre os efeitos peculiares de uma elevada multicolinearidade, podem ser citados: estimativa inconsistente de coeficiente de regressão e também uma superestimativa dos efeitos diretos das variáveis explicativas sobre a variável resposta, o que pode levar a interpretação equivocada (CRUZ E CARNEIRO, 2012).

Por estas razões, uma análise de trilha é feita, investigando a relação de causa-efeito entre as variáveis avaliadas sobre uma variável principal. Teodoro et al. (2014) afirmam que esta análise fornece um conhecimento detalhado da influência dos traços e justifica a existência de correlações positivas e negativas de alta e baixa magnitude entre os traços estudados. No entanto, para obter efeitos diretos e indiretos por meio da análise de trilha, é necessário que a matriz $X'X$ esteja bem condicionada. Na presença de multicolinearidade, as variâncias associadas aos estimadores dos coeficientes de trajetória podem tornar-se excessivamente altas, tornando a análise pouco confiável. Além disso, as estimativas de parâmetros podem aceitar valores absurdos ou sem sentido em relação ao fenômeno biológico estudado (CRUZ et al., 2012).

De acordo com o critério NC apresentado por Montgomery e Peck (2012), a matriz de estimativa das correlações de Pearson obtida aqui apresentou forte multicolinearidade (NC = 789). Assim, na presença de multicolinearidade, todas as variáveis avaliadas na análise de trilha podem ser incluídas, mas uma constante ($k = 0,05$) deve ser adicionada à diagonal da matriz de correlação para resolver este problema. Essa constante causou que o determinante da matriz de correlação fosse diferente de zero.

Neste trabalho, a apresentação dos resultados foi feita por meio de um esquema em que é possível verificar que as variáveis que tiveram o maior efeito direto sobre a produtividade do alho foram massa de bulbilhos, número de bulbilhos seguido do diâmetro do bulbo e altura do bulbo (Figura 5). Considerando que uma variável seja viável para seleção direta de plantas mais produtivas, necessita-se que tenha efeito direto e alta correlação na mesma direção que o rendimento do alho. Desta forma, as variáveis diâmetro do bulbo e massa de bulbilhos são as mais adequadas para a seleção direta de uma variedade de alho mais produtiva, uma vez que têm uma relação de causa e efeito com a produtividade da cultura.

Figura 5 - Análise de trilha entre os traços morfológicos produtividade do alho (PR), com os seus componentes primários massa total (MT), comprimento do pendão floral (CP), comprimento da folha (CF), largura da folha (LF), massa seca (MS), diâmetro do pseudocaule (DC), número de bulbilhos (DE), massa de bulbilhos (MD), raiz (RA), diâmetro do bulbo (DB), altura do bulbo (AB), superbrotamento (SU), e a interferência do componente externo, irrigação aplicada na formação dos bulbilhos (IRR), da análise de trilha realizada



Fonte: O autor.

Neste estudo foi obtido alto coeficiente de determinação (0,9554), que por sua vez pode ser implementado para melhoria e valorização desta importante cultura olerícula através de estudos mais aprimorados do manejo da irrigação com consequente conservação dos recursos naturais. Este resultado sugere que as variáveis avaliadas explicam grande parte da produtividade (variável dependente principal).

6.4 Conclusões

As análises possibilitaram constatar que entre os componentes primários da produtividade do alho, massa de bulbilhos, número de bulbilhos seguido do diâmetro do bulbo e altura do bulbo, são os índices fenológicos de maiores potencialidades para seleção e identificação de rendimento da produtividade do alho.

A irrigação com déficit aplicada no estágio de formação dos bulbilhos, tem uma relação negativa com a massa seca, altura da cabeça e superbrotamento.

6.5 Referências

- BABALESHWAR, S. B., KOPPAD, S. R., MATH, K. K., & DHARMATTI, R. Influence of sulphur on growth and yield of garlic (*Allium sativum* L.). **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**,6 (5), 450-452. 2017.
- CASTELLANOS, J. Z., VARGAS-TAPIA, P., OJODEAGUA, J. L., HOYOS, G., ALCANTAR-GONZALEZ, G., MÉNDEZ, F. S.& GARDEA, A. A. GARLIC Productivity and profitability as affected by seed clove size, planting density and planting method.**Hortscience**,39 (6), 1272-1277. 2004.
- COSTA, T.M.P.; SOUZA, R.J.; SILVA, A.M. Efeitos de diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio sobre a cultura do alho (*Allium sativum* L). **CIÊNCIA E PRÁTICA**, V. 17, N. 3, P. 239-246, 1993.
- CRUZ, C.D.; CARNEIRO, P.C.S. and REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao Melhoramento Genético**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV 2012.
- CRUZ, C.D. GENES: A Software Package for Analysis in Experimental Statistics and Quantitative Genetics. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v.35, p. 271-276, 2013.
- ETOH, T., SIMON, P.W. Diversity, fertility and seed production in garlic. in: Rabinowitch, H. D, Currah, L. (eds.), *Allium crop science: recent advances*. Cabi, **Wallingford**, UK, pp. 101–117. 2002.
- FARIAS, F.J.C.; CARVALHO, L.P.; SILVA FILHO, J.L. and TEODORO, P.E. Correlations and path analysis among agronomic and technological traits of upland cotton. **Genetics and Molecular Research Journal**, v.15, n.3, 2016.

FAOSTAT, Statistics Database. <<http://www.fao.org/faostat/en/#home>> acessado: dezembro 2018.

GUIMARÃES, R.A.M.; BRAZ, A.J.B.P.; SIMON, G.A.; FERREIRA C.J.B.; BRAZ G.B.P.; SILVEIRA, P.M. Resposta de cultivares de feijoeiro a adubação nitrogenada em diferentes estádios fenológicos. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.10, n.01, p.136 – 148, 2017.

MAMBRIN, R.B., RIBEIRO, N.D.; STORCK, L., DOMINGUES, L.S., BARKERT, K.A. Seleção de linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) baseada em variáveis morfológicas, fenológicas e de produção. **Revista de Agricultura** v.90, n.2, p. 141 - 155, 2015.

MAROUELLI, W. A.; BRAGA, M. B.; LUCINI, M. A.; RESENDE, F. V. Circular Técnica 136: Irrigação na cultura do alho. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Embrapa**, Brasília-DF. 24 P, 2014.

MONTGOMERY, D.C.; PECK, E.A.; VINING, G.G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. 5. ed. Wiley: New York, 2012, 672 p.

OLIVEIRA, J. T., DA SILVA RIBEIRO, I., ROQUE, C. G., MONTANARI, R., GAVA, R., & TEODORO, P. E. Contribution of morphological traits for grain yield in common bean. **Bioscience Journal**, 34 (2). 2018.

OLIVEIRA, R. A.; RAMOS, M. M. **Manual do irrigâmetro**. Viçosa, MG: UFV, 144 p. 2008.

SILVA, K.J.; TEODORO, P.E.; MENEZES, C.B.; JULIO, M.P.M.; SOUZA, V.F.; SILVA, M.J.; PIMENTEL, L.D. and BOREM, A. Contribution of morph agronomic traits to grain yield and earliness in grain sorghum. **Genetics and Molecular Research Journal**. V.16, n.2, 2017a.

SILVA, L.A.; TEODORO, P.E.; PEIXOTO, L.A.; ASSIS, C.; GASPARINI, K.; BARBOSA, M.H.P.B. and BHERING, L.L. Selecting sugarcane genotypes by the selection index reveals high gain for technological quality traits. **Genetics and Molecular Research Journal**, v.16, n.2, 2017b.

TEODORO, P.E.; RIBEIRO, L.P.; CORREA, C.C.G.; LUZ JUNIOR, R.A.A.; ZANUNCIO, A.; CAPRISTO, D.P. and TORRES, F.E. Path analysis in soybean genotypes as function of growth habit. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, p. 794-799, 2015.

TEODORO, P.E.; SILVA, C.A.; JUNIOR CORRÊA, C.C.; RIBEIRO, L.P. et al. Path analysis and correlation of two genetic classes of maize (*Zea mays* L.). **Journal of Agronomy**, Deira Dubai, v. 13: 23-28, 2014. <http://dx.doi.org/10.3923/ja.2014.23.28>.

7 CAPÍTULO 4 - Relações lineares e espaciais entre condutividade elétrica e atributos físicos do solo e a produtividade e superbrotamento do alho irrigado

Resumo

No Brasil, a importância socioeconômica do alho (*Allium sativum* L.) é relevante por ser uma especiaria muito utilizada como tempero de alimentos e como medicamento natural. Este trabalho foi conduzido no ano agrícola de 2018/19, em um Latossolo Vermelho Amarelo, classificado texturalmente como argilo-arenoso, com 39% de argila e 46% de areia. O trabalho foi desenvolvido na Área de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil. O objetivo foi: a) analisar a variabilidade espacial dos atributos estudados da planta e do solo; b) definir as correlações lineares e espaciais entre os atributos de planta e do solo; e c) identificar, entre os atributos da planta, a condutividade elétrica e os atributos físicos do solo estudados, aqueles que melhor se correlacionem espacialmente com a produtividade e superbrotamento do alho para elaboração de mapas de variabilidade espacial. Os atributos avaliados foram produtividade do alho, condutividade elétrica, resistência mecânica à penetração nas camadas 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 e 0-0,40 m, umidade volumétrica na profundidade de 0-0,20 m, tensão de água na planta e superbrotamento, amostrado em uma malha de 90 pontos georreferenciados. A análise dos dados por meio das técnicas estatísticas e da geoestatística possibilitou constatar que os atributos produtividade do alho, condutividade elétrica, resistência mecânica à penetração, umidade volumétrica, tensão de água na planta e superbrotamento apresentaram dependência espacial. Os valores de alcance da dependência espacial a serem considerados em trabalhos futuros utilizando os mesmos atributos deverão estar compreendidos entre 8 metros para condutividade elétrica e 23 metros para resistência à penetração. Do ponto de vista espacial, o superbrotamento do alho pôde ser estimado por meio da cokrigagem indireta com a resistência à penetração. Assim, valores superiores a 3000 kPa desse atributo do solo indicaram sítios com as mais baixas produtividades.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Geoestatística. Irrigação. *Allium sativum* L.

Abstract

Linear and spatial relationships of electrical conductivity and soil physical attributes with irrigated garlic yield and sprouting

In Brazil, the socioeconomic importance of garlic (*Allium sativum* L.) is relevant because it is a spice widely used as a food spice and as a natural medicine. In the agricultural year of 2018/19, this work was conducted in a Red Yellow Latosol classified as sand-clay with 39% clay and 46% sand. The work was developed in the area of irrigation and drainage of the Federal University of Viçosa, in Viçosa, Minas Gerais, Brazil. The objective was: a) to analyze the spatial variability of the studied attributes of the plant and the soil; b) define the linear and spatial correlations between plant and soil attributes; and c) to identify, among the attributes of the plant, the electrical conductivity and the physical attributes of the studied soil, those that best correlate spatially with garlic productivity and sprouting for the elaboration of maps of spatial variability. The attributes evaluated were the productivity of garlic, electrical conductivity, mechanical resistance to penetration in the 0-0,10 layers; 0.10-0.20; 0.20-0.30; 0.30-0.40 and 0-0.40 m respectively, volumetric humidity in the 0-0.20 m depth, plant water

tension and sprouting sampled in a mesh of 90 georeferenced points. Data analysis using statistical techniques and geostatistics allowed us to verify that the attributes of garlic, electrical conductivity, mechanical resistance to penetration, volumetric humidity, plant water stress and sprouting presented spatial dependence. The range values of spatial dependence to be considered in future works using the same attributes should be between 8 meters for electrical conductivity and 23 meters for resistance to penetration. From the spatial point of view, the garlic supergrowth could be estimated by indirect cokriging with resistance to penetration. Thus, values above 3000 kPa of this soil attribute indicated sites with the lowest yields.

Key words: Precision agriculture. Geostatistics. Irrigation. *Allium sativum* L.

7.1 Introdução

No Brasil, a importância socioeconômica do alho (*Allium sativum* L.) é relevante por ser uma espécie muito utilizada como tempero de alimentos e como medicamento natural, trazendo muitos benefícios para a saúde, como combate a vírus, bactérias e fungos, além de atuar como anti-inflamatório. Cultivado em praticamente todo o território nacional, com área total de 11.130 ha e produção de 79.721 mil t. no ano de 2017 (IBGE, 2018), sua produção foi ampliada nas últimas décadas graças ao cultivo de variedades nobres no Cerrado, fazendo uso da técnica da frigidificação (“vernalização”) do “alho-semente” (PUIATTI, 2017).

A presença de anormalidades fisiológicas em alho é um dos fatores que mais causam redução na produtividade. O superbrotamento é uma anomalia de causas genético-fisiológicas caracterizada pela brotação antecipada dos bulbilhos antes da colheita. É uma característica que influi negativamente na cultura do alho, pois, além de reduzir a produtividade de bulbos comerciais, deprecia o produto, fazendo com que seu valor de mercado seja comprometido (PUIATTI, 2017).

O solo em condições ideais para o desenvolvimento radicular é explorado de forma homogênea pelas raízes, e o volume do solo é relativamente maior do que em solos com problemas de compactação (VALADÃO et al., 2015). Determinados estados de compactação provocam mudanças na estrutura do solo, resultando em aumento da densidade do solo e resistência do solo à penetração (CORTEZ et al., 2018).

Na tentativa de desenvolver técnicas de medida indireta de atributos do solo, a condutividade elétrica tem se destacado. Uma de suas utilidades na agricultura provém do fato de a massa do solo, com sua variabilidade na composição físico-química, apresentar diferentes níveis de condutividade elétrica (MACHADO et. al., 2015). Os métodos de determinação dos atributos físicos e químicos do solo são, em geral, onerosos e demandam grande quantidade de tempo e mão de obra. Por outro lado, a mensuração da condutividade

elétrica surge como uma forma mais rápida e barata, podendo ser utilizada como medida indireta para caracterizar a variabilidade espacial com menor custo (LOPES et al., 2017).

No âmbito da geoestatística, o estudo da técnica auxilia os programas computacionais empregados na agricultura de precisão, ou seja, os dados gerados e ajustados da interpolação simples de dados (krigagem) e da interpolação cruzada (cokrigagem) entre atributos da planta versus outro atributo servem como base para estimar a variabilidade espacial de determinada variável por meio de outra, com facilidade de determinação (Montanari et al., 2015).

Diante do exposto objetivou-se: a) analisar a variabilidade dos atributos estudados da planta e do solo; b) definir as correlações lineares e espaciais entre os atributos de planta e do solo; e c) identificar, entre os atributos da planta, condutividade elétrica e atributos físicos do solo, aqueles que melhor se correlacionem espacialmente com a produtividade e o superbrotamento do alho para elaboração de mapas de variabilidade espacial.

7.2 Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido em Viçosa, Minas Gerais, Brasil, na Área de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, nas proximidades das coordenadas geográficas: 23 K, 722569.09 m E; 7701897.59 m S (UTM). De acordo com a Köppen e Geiger, o clima é classificado como Cwa. A temperatura média em Viçosa é de 20,6 °C. A pluviosidade média anual de 1.229 mm.

O solo no qual as malhas experimentais foram instaladas foi classificado texturalmente segundo EMBRAPA (2018), como Latossolo Vermelho Amarelo argilo-arenoso. O valor da análise granulométrica na profundidade de 0,0 a 0,2 m, foi de 460, 150 e 390 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente. O pH em H₂O foi de 6,0 e o teor de matéria orgânica, de 2,18 dag kg⁻¹. Os valores de P e K foram 21,2 e 135,0 mg dm⁻³ respectivamente. A soma de bases foi de 3,7 cmol_c dm⁻³ e a CTC total do solo de 6,1 cmol_c dm⁻³.

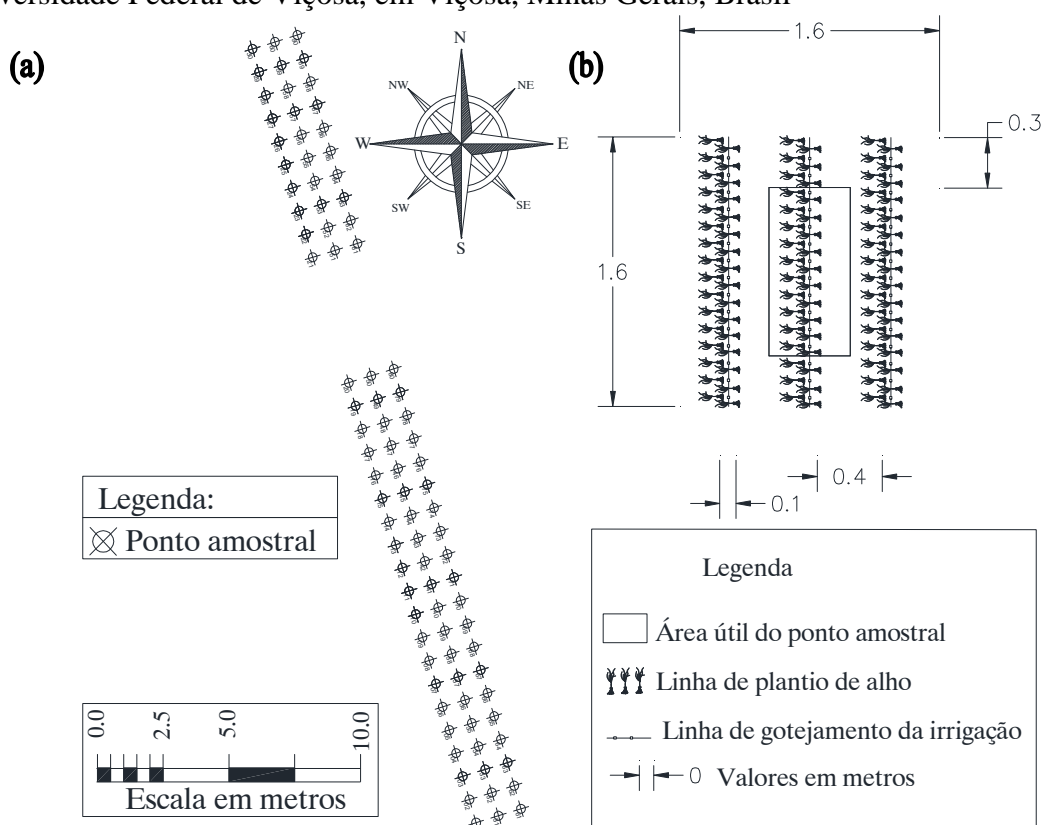
Na área de condução da lavoura, com sistema de plantio convencional em área irrigada, foram feitas aração e gradagem e passada enxada rotativa para confecção dos canteiros para plantio do alho. A área foi preparada entre 01 e 05/05/2018 e em 07/05/2018 foi semeado o cultivar de alho roxo Ito. Cada ponto amostral foi constituído por um canteiro com 1,6 m de largura e 1,6 m de comprimento, totalizando uma área de 2,56 m², sendo três linhas duplas de alho e a área útil composta pela linha central, onde as adjacentes foram utilizadas como bordadura (Figura1). As extremidades (0,30 m) da linha central também foram desconsideradas para fins de avaliação, sendo utilizadas como bordadura. O

espaçamento entre as linhas duplas foi de 0,40 m e 0,10 m entre as linhas da linha dupla (MAROUELLI et al., 2014).

Foram definidas direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas e feito o estaqueamento da malha experimental próximo ao final do ciclo do alho, isto é, no segundo decêndio de setembro/2018, espaçadas de 1,6 m entre elas. Cada malha experimental foi constituída de três transeções de 48 m x 1,6 m. Portanto, as transeções foram espaçadas de 1,6 m, com pontos amostrais esquadrejados em 1,6 m x 1,6 m, contendo 90 deles (Figura 1).

Foi aplicada irrigação via gotejamento e feito o monitoramento da necessidade hídrica da cultura durante a condução do experimento com manejo via aparelho Irrigâmetro (OLIVEIRA, 2008). Com isto, obtivemos a produtividade do alho (PR), que foi determinada pesando a massa do bulbo, sendo expressa em kg ha^{-1} . O superbrotamento (SU) foi obtido pela porcentagem de plantas de alho superbrotadas em cada ponto amostral.

Figura 1 - (a) Malha amostral e detalhamento da amostragem (b) croqui do canteiro de plantio, representando um ponto amostral feito na Área de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil



Fonte: O autor.

A condutividade elétrica (CE) do solo foi obtida com uso do equipamento Eletrical Resistivity LandMapper, modelo ERM-02. O dispositivo mediu a resistividade elétrica em uma camada superficial da profundidade de 0 até 0,40 m, com uso de uma sonda de quatro eletrodos, expresso em dS m^{-1} , medido um dia após colheita, ou seja, no dia 14/09/2018.

A resistência mecânica à penetração (RP1, RP2, RP3, RP4, RPM), cujo número que acompanha o atributo se refere à profundidade, sendo: 1- profundidade de 0 a 0,10 m; 2- profundidade de 0,10 a 0,20 m; 3- profundidade de 0,20 a 0,30 m; 4- profundidade de 0,30 a 0,40 m; exceto RPM que se refere à resistência à penetração na camada de 0 a 0,40 m calculada pela média de todas as leituras feitas a cada 0,005 m de profundidade. Para a determinação da resistência do solo à penetração, utilizou-se um penetrômetro digital Falker modelo PenetroLOG-PLG 1020, configurado para registrar leituras em velocidade de penetração constante com a unidade em kPa, obtido em 14/09/2018.

Para a determinação da umidade volumétrica (UV) (kg kg^{-1}), foi utilizado o aparelho da empresa Falker modelo HidroFarm com o sensor de medição HFM1010 comprimento de 0,20 m, com resultados de umidade expressos em %, obtidos em 14/09/2018.

A medição de tensão de água na planta de alho foi obtida com a utilização do equipamento bomba de Scholander ou câmara de Scholander, modelo SEC-3005H07G4P40. Uma folha da planta do alho cortada foi inserida na câmara com uma ponta saliente em relação ao suporte de espécie. A pressão foi aplicada no interior da câmara até a pressão exceder a tensão interior do tecido vegetal e a seiva do xilema começar a escoar da região cortada da amostra. A tensão então foi lida diretamente do manômetro, expresso em kPa, aos 86 dias após o plantio, obtendo a tensão (SHA) antes da irrigação e aos 87 dias após o plantio e seis horas depois da aplicação de lâmina de irrigação (SHD).

Para cada atributo estudado, foi feita a análise descritiva clássica, com auxílio do programa estatístico Rbio (biometria no R), versão 17, tendo sido calculados a média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria, e feita a análise da distribuição de frequência dos dados. Desta forma, para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade dos componentes produtivos (x), foi utilizado o teste de Shapiro e Wilk (1965) a 5%. Neste teste, a estatística testa a hipótese nula, a qual julga ser a amostra proveniente de uma população com distribuição normal.

Para expressar graficamente a relação funcional entre as estimativas de correlação entre os atributos, foi utilizada uma rede de correlação, na qual a proximidade entre nós (traços) foi proporcional ao valor absoluto entre sua correlação. A espessura das bordas foi controlada aplicando um valor de corte de 0,50, o que significava que apenas $|r_{ij}| \geq 0.50$ teve

as margens destacadas. Finalmente, as correlações positivas foram representadas em verde, enquanto as negativas, em vermelho.

A análise de correlação espacial foi feita utilizando o GeoDA livre e de código aberto software (ANSELIN et al., 2005). O índice bivariado global de Moran e o Moran bivariado local foram calculados entre os atributos estudados. O índice de Bivariada de Moran foi usado para representar o grau de correlação espacial entre duas diferentes variáveis espaciais correlacionadas. O nível de pseudo-significância do índice de bivariada de Moran foi testado usando a randomização (999 permutações), com base no método de Monte Carlo. (ANSELIN et al., 2005).

Isoladamente, para cada atributo, foi analisada sua dependência espacial, pelo cálculo do semivariograma simples. Contudo, para aqueles que apresentaram interdependência espacial, foram calculados também seus semivariogramas cruzados, com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote Gamma Design Software (GS+, 2004). Para cada atributo, foram relacionados o efeito pepita (C_o), o alcance (A_o) e o patamar ($C_o + C$) (GS+, 2004).

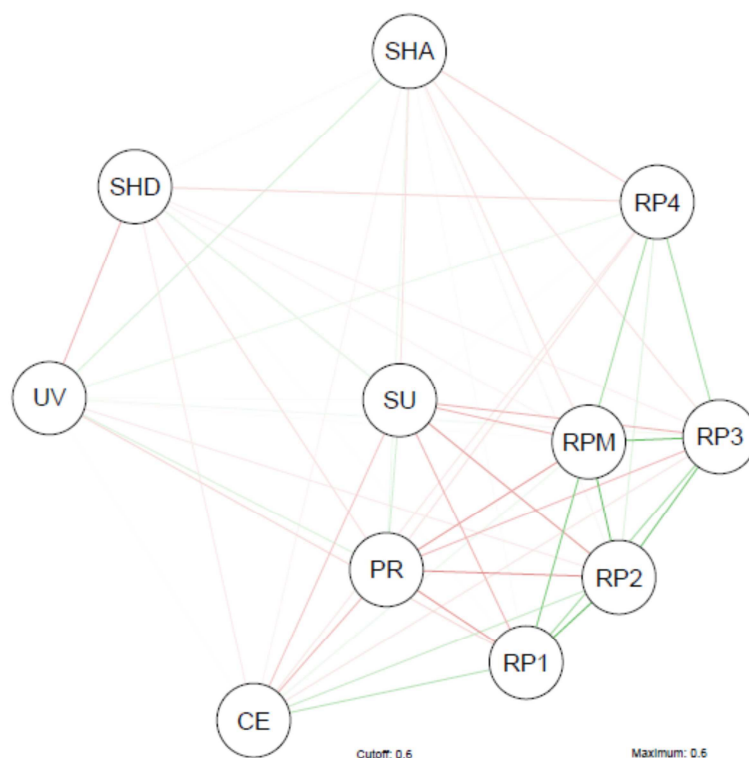
Trabalhando na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da interpolação, os mapas de krigagem e de cokrigagem para análise da dependência e da interdependência espacial entre os atributos.

7.3 Resultados e discussão

Por meio da rede de correlação de Pearson, Figura 2, foi constatada correlação negativa entre a produtividade e CE, RP1, RP2, RP3, RP4 e RPM, com coeficientes de correlação variando entre -0,154* e -0,348**. Já para o superbrotamento, houve correlação significativa negativa com RP1, RP2, RP3, RP4, RPM e UV, variando entre -0,105* e -0,302**. Esses resultados confirmam a estreita correlação negativa entre PR e SU do alho e as resistências às penetrações estudadas.

Foi constatada correlação significativa positiva entre a PR e SU, com coeficiente de correlação de 0,126*. Merecem destaque as correlações significativas positivas entre as resistências a penetrações (RP1, RP2, RP3, RP4 e RPM), chegando a 0,930** entre RP3 e RPM. Dalchiavon et al. (2014), estudando resistência à penetração em um Argissolo Vermelho Eutrófico, também encontraram correlação positiva e significativa entre RP1 e RP2 da ordem de 0,336**. Lima et al. (2017), encontraram correlação significativa entre RP1 e RP2 de 0,315* em um solo típico Quartzarênico.

Figura 3 - Rede de correlações de Moran dos atributos estudados: produtividade do alho (PR), condutividade elétrica (CE), resistência à penetração (RP1, RP2, RP3, RP4, RPM), umidade volumétrica (UV), tensão de água na planta (SHA, SHD) e superbrotamento (SU)



Fonte: O autor.

Os resultados referentes à análise descritiva para os atributos PR, RP3, RP4, RPM, UV, SHA e SHD, apresentados na Tabela 1, indicaram ajuste a distribuição normal, já os atributos CE, RP1, RP2 e SU apresentaram distribuição de frequência do tipo indeterminado. Os valores da média e mediana estão próximos, mostrando distribuições simétricas para os atributos, exceto SU, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria próximos de zero.

A produtividade média do alho foi de $10.351,0 \text{ kg ha}^{-1}$, estando dentro dos valores encontrados em alho irrigado com alta tecnologia. Resultados semelhantes foram encontrados por Macedo et al., (2006), que encontraram produtividades médias do alho de 9.760 kg ha^{-1} , e por Prato Sarmiento (2016), que estimou produtividade de 9.500 kg ha^{-1} . O IBGE estimou a produtividade média do Alho no Brasil no ano de 2017 em 7.162 kg ha^{-1} .

Tabela 1 - Estatística descritiva dos componentes produtivos da cultura do alho, da condutividade elétrica e dos atributos físicos do solo

Atributo	Média	Mediana	Míni- mo	Máxi- mo	Desvio padrão	Varia- ção (%)	Cur- tose	Assi- metria	Pr<w	DF
PR	10351,0	10370,4	8370,4	12518,5	840,4	8,1	-0,11	-0,10	0,6587	NO
CE	3,7	3,5	2,5	5,2	2,6	17,5	-0,24	0,74	0,0002	IN
RP1	668,7	551,5	137,0	2240,0	439,0	65,7	0,95	1,08	4×10^{-6}	IN
RP2	2806,0	2602,5	705,0	6438,0	1478,0	52,7	-0,78	0,47	0,0010	IN
RP3	5073,0	5150,5	1997,0	8421,0	1432,0	28,2	-0,50	-0,14	0,2052	NO
RP4	5600,0	5684,0	2752,0	7724,0	969,0	17,3	0,07	-0,45	0,2131	NO
RPM	1727,0	1811,0	786,0	2669,0	432,0	25,0	-0,62	-0,17	0,1434	NO
UV	25,3	25,0	17,4	35,2	4,0	15,8	-0,57	0,30	0,3189	NO
SHA	179,7	180,0	110,0	240,0	27,1	15,1	-0,58	-0,15	0,3600	NO
SHD	159,7	160,0	100,0	215,0	24,7	15,5	-0,42	0,18	0,3554	NO
SU	9,3	6,3	0,0	46,9	9,4	100,3	3,10	1,55	3×10^{-8}	IN

Produtividade do alho, kg ha⁻¹ (PR), condutividade elétrica, dS m⁻¹ (CE), resistência mecânica à penetração, kPa (RP1, RP2, RP3, RP4, RPM), umidade volumétrica, kg kg⁻¹ (UV), tensão de água na planta, kPa (SHA, SHD) e superbrotamento, % (SU), DF = distribuição de frequência: NO, do tipo normal e IN, indeterminado.

Lopes et al. (2017) encontraram valores de condutividade elétrica em solo arenoso de 5,5 dS m⁻¹ e 5,3 dS m⁻¹. Araujo et al. (2016) encontraram CE de 6,76 dS m⁻¹ em solo Latossolo Vermelho Amarelo distrófico com teor de argila em torno de 50%. Estes resultados, que diferiram dos valores encontrados no presente estudo, podem ser explicados pelo fato de os solos referenciados terem teores de areia, silte e argila diferentes do solo aqui estudado.

No resumo da análise estatística descritiva da resistência do solo à penetração (RP) nas diferentes camadas estudadas, Tabela 1, observa-se aumento da RP com profundidade até a camada de 0,30-0,40 m, em que são encontrados teores máximos de compactação. Cortez et al. (2014) apontam que a menor RP encontrada na camada de 0,0-0,10 m em relação às camadas subjacentes pode ser atribuída à deposição de matéria orgânica, que contribui para a redução da densidade do solo. Relatos em projetos de pesquisa (CORTEZ et al., 2018), apontam que valores restritivos podem variar de 1500 a 4000 kPa em função da cultura. Em relação ao alho, valor médio da RP de 1727 kPa não afetou a produtividade da cultura no presente estudo, mas vale destacar que até a profundidade de 0 a 0,20 m a RP foi abaixo de 3000 kPa e em profundidades de 0,20 a 0,40 m, a RP chegou a passar de 5000 kPa, indicando compactação do solo nas camadas mais profundas. Este resultado possivelmente aconteceu devido a uma má preparação dos canteiros com implementos atuando em baixa profundidade.

A variabilidade de um atributo pode ser classificada, segundo Warrick (1980) (este autor classifica em baixa, média e alta os coeficientes de variação (CV's)), de acordo com a magnitude. Verifica-se, na Tabela 1 que os (CV's) situaram entre baixos e altos, com destaque

para a PR, que apresentou menor valor. Esse padrão é utilizado como indicativo de precisão experimental, de forma que, quanto menor o valor da sua estimativa, maior terá sido sua precisão. A CE obteve CV de 17,5% enquadrado como médio. Lopes et al. (2017), encontraram CV baixo, de 9,0 e de 6,0 para a CE. Já Araujo et al. (2016), encontraram o CV de 10,9 %.

O estudo dos atributos apresentou coeficientes de assimetria positiva para CE, RP1, RP2, UV, SHD e SU, respectivamente, de 0,74; 1,08; 0,47; 0,30; 0,18 e 1,55 e negativa para PR, RP3, RP4, RPM e SHA, de -0,10, -0,14, -0,45; -0,17 e -0,15 respectivamente. Já os coeficientes de curtose positiva para RP1, RP4 e SU foram de 0,95; 0,07 e 3,10, respectivamente.

Os componentes PR, RP3, RP4, RPM, UV, SHA e SHD foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que suas respectivas probabilidades foram de 0,6587; 0,2052; 0,2131; 0,1434; 0,3189; 0,3600 e 0,3554. Cortez et al. (2018) encontraram distribuição normal para RP1 e RP2 e distribuição não normal para RP3, RP4 e RPM, diferindo da distribuição de normalidade encontrada no presente estudo.

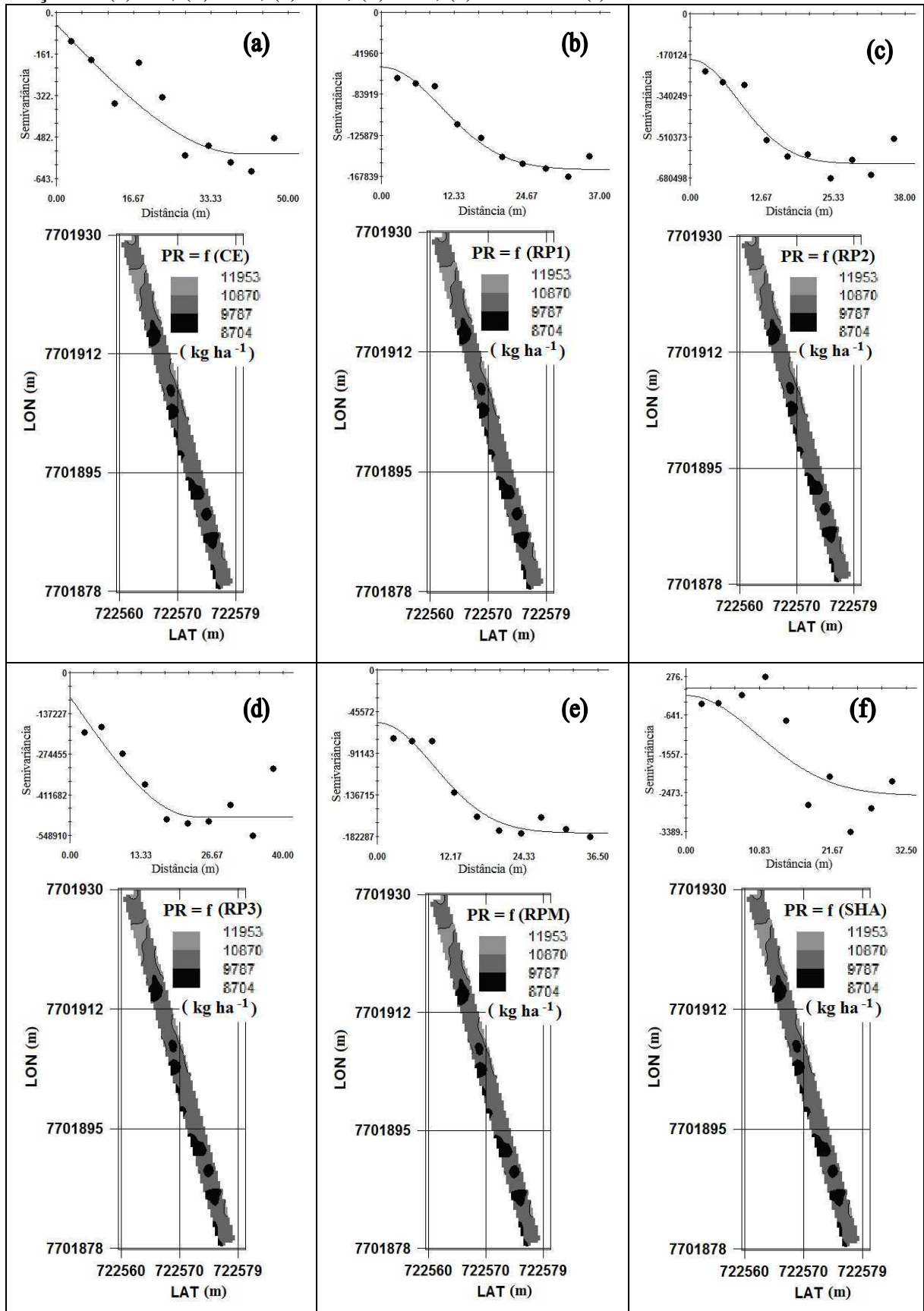
A análise geoestatística, Tabela 2, mostrou dependência espacial para os semivariogramas simples dos atributos RP2, RP4, UV, que se ajustaram ao modelo esférico, enquanto PR, CE, RP1, RP3, RPM e SHA se ajustaram ao modelo exponencial. O atributo SU se ajustou ao modelo gaussiano e SHD obteve efeito pepita puro. Cortez et al. (2018), encontraram modelo de ajuste do semivariograma simples do tipo esférico para todas as resistências estudadas (RP1, RP2, RP3, RP4 e RPM) em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Analisando os ajustes dos semivariogramas cruzados, $PR = f(CE)$ e $PR = f(RP3)$, observa-se que eles se ajustaram ao modelo esférico, Tabela 2 e Figura 4, enquanto todos os demais se ajustaram ao modelo Gaussiano (Tabela 2 e Figuras 4 e 5).

Tabela 2 - Parâmetros estimados para os semivariogramas simples e cruzados dos componentes produtivos da cultura do alho, da condutividade elétrica e dos atributos físicos do solo

Atributo ^(a)	Modelo ^(b)	Pepita C ₀	Patamar C ₀ +C	Alcance A ₀ (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)	
							%	Classe
Semivariograma simples								
PR	exp	3,9x10 ⁶	7,7x10 ⁶	12,6	0,714	1,6x10 ¹⁰	50,0	Moderada
CE	exp	1,0x10 ⁻²	7,2x10 ⁰	8,0	0,956	0,9x10 ⁰	99,9	Forte
RP1	exp	1,1x10 ⁵	2,0x10 ⁵	15,0	0,610	3,1x10 ⁹	44,5	Moderada
RP2	esf	1,2x10 ⁶	2,7x10 ⁶	23,0	0,831	3,3x10 ¹¹	54,4	Moderada
RP3	exp	9,3x10 ⁵	2,3x10 ⁶	14,7	0,733	2,0x10 ¹¹	58,9	Moderada
RP4	esf	2,4x10 ⁵	9,7x10 ⁵	5,0	0,132	3,1x10 ¹¹	75,2	Forte
RPM	exp	5,2x10 ⁴	2,1x10 ⁵	15,0	0,863	1,1x10 ⁹	75,5	Forte
UV	esf	4,0x10 ⁰	1,6x10 ¹	2,5	0,264	1,7x10 ¹	75,3	Forte
SHA	exp	3,6x10 ²	7,8x10 ²	8,0	0,067	11,1x10 ⁵	53,7	Moderada
SHD	epp	6,1x10 ²	6,1x10 ²	-	-	-	-	-
SU	gau	4,4x10 ⁰	1,5x10 ¹	35,0	0,787	4,5x10 ¹	69,9	Moderada
Semivariograma cruzado								
PR=f(CE)	esf	- 4,6x10 ¹ - 5,5x10 ²	40,0	0,804	6,2x10 ⁴	91,6	Forte	
PR=f(RP1)	gau	- 5,6x10 ⁴ - 1,6x10 ⁵	25,0	0,961	5,6x10 ⁸	65,2	Moderada	
PR=f(RP2)	gau	- 1,9x10 ⁵ - 6,2x10 ⁵	21,0	0,882	2,9x10 ¹⁰	69,4	Moderada	
PR=f(RP3)	esf	- 8,1x10 ⁴ - 4,8x10 ⁵	23,4	0,754	4,2x10 ¹⁰	83,3	Forte	
PR=f(RPM)	gau	- 5,7x10 ⁴ - 1,8x10 ⁵	23,0	0,935	1,2x10 ⁹	67,7	Moderada	
PR=f(SHA)	gau	- 1,8x10 ² - 2,5x10 ³	26,0	0,701	5,4x10 ⁶	92,9	Forte	
SU=f(RP1)	gau	- 5,3x10 ¹ - 2,3x10 ³	34,0	0,896	7,8x10 ⁵	97,7	Forte	
SU=f(RP2)	gau	- 1,0x10 ¹ - 7,9x10 ³	36,0	0,821	2,1x10 ⁷	99,9	Forte	
SU=f(RP3)	gau	- 6,1x10 ² - 8,0x10 ³	38,0	0,710	3,0x10 ⁷	92,4	Forte	
SU=f(RPM)	gau	- 1,0x10 ² - 2,5x10 ³	37,0	0,762	2,5x10 ⁶	96,0	Forte	

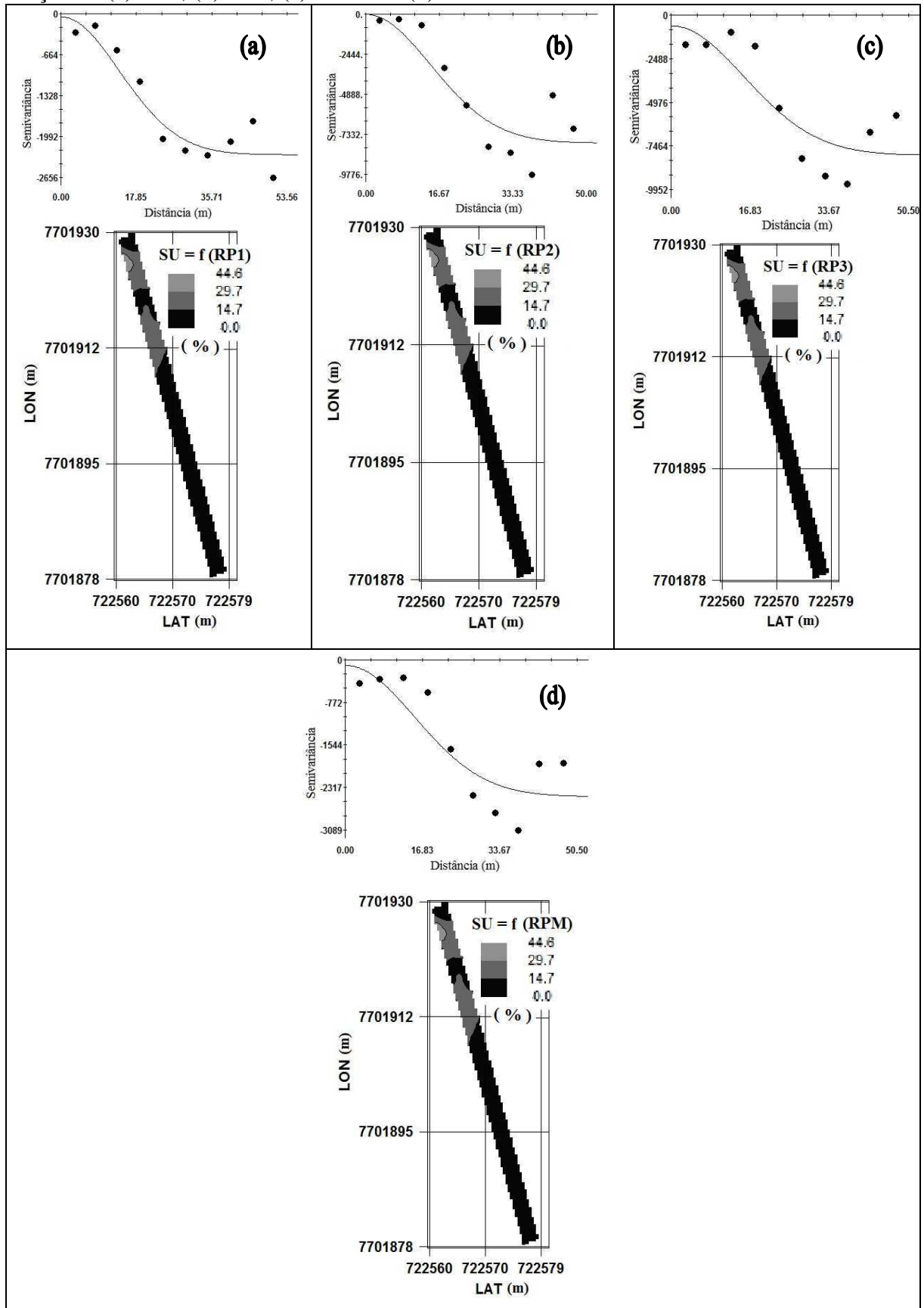
(a) Semivariogramas simples: Produtividade do alho, kg ha⁻¹ (PR), condutividade elétrica, dS m⁻¹ (CE), resistência mecânica à penetração, kPa (RP1, RP2, RP3, RP4, RPM), umidade volumétrica, kg kg⁻¹ (UV), tensão de água na planta, kPa (SHA, SHD) e superbrotamento, % (SU). Semivariogramas cruzados: PG = produtividade do alho, em função f(CE) = condutividade elétrica, f(RP1) = resistência à penetração de 0 a 0,10 m, f(RP2) = resistência à penetração de 0,10 m a 0,20 m, f(RP3) = resistência à penetração de 0,20 a 0,30 m, f(RPM) = resistência à penetração média de 0 a 0,40 m, f(SHA) = tensão de água na planta antes da aplicação da irrigação, SU = superbrotamento, em função, f(RP1) = resistência à penetração de 0 a 0,10 m, f(RP2) = resistência à penetração de 0,10 m a 0,20 m, f(RP3) = resistência à penetração de 0,20 a 0,30 m, f(RPM) = resistência à penetração média de 0 a 0,40 m. (b) esf = esférico e gau = Gaussiano; (c) SQR = Soma do quadrado do resíduo; (d) ADE = avaliador da dependência espacial (b) esf = esférico, exp = exponencial, epp = efeito pepita puro e gau = gaussiano; (c) SQR = Soma do quadrado do resíduo; (d) ADE = avaliador da dependência espacial.

Figura 4 - Semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem da produtividade do alho em função de (a) CE, (b) RP1, (c) RP2, (d) RP3, (e) RPM e de (f) SHA



Fonte: O autor.

Figura 5 - Semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem do superbrotamento do alho em função de (a) RP1, (b) RP2, (c) RP3 e de (d) RPM



Fonte: O autor.

Os atributos dos semivariogramas simples obtiveram alcances que variaram de 2,5 m (UV) a 35,0 m (SU). Assim, estes atributos do solo e da planta mostraram que a distribuição deles no espaço não é aleatória, uma vez que suas classes de dependência espacial variaram de 44,5% (moderada para a RP1) a 99,9% (forte para CE). Já analisada pela grandeza do alcance (Ao) dos semivariogramas cruzados, variou de 21,0 a 40,4 para PR = f(RP2), PR = f(CE), respectivamente. O conhecimento dos valores de alcance e as coordenadas das áreas, onde estão concentrados as maiores verificações e as menores de determinada variável física, são importantes para o planejamento do manejo imposto no preparo do solo, na agricultura de precisão.

Quando feitos os semivariogramas cruzados entre a produtividade do alho e do superbrotamento e os demais atributos, foram encontradas somente correlações espaciais negativas (Tabela 2). Para a PG = f(CE), PG = f(RP3) e PG = f(SHA), foi observada forte dependência espacial (ADE = 91,6; 83,3 e 92,9 %, respectivamente). Para o SU = f(RP1), SU = f(RP2), SU = f(RP3), SU = f(RPM), as dependências espaciais foram fortes (ADE = 97,7; 99,9; 92,4 e 96,0 %, respectivamente). Os resultados mostram relação inversa entre a produtividade do alho e condutividade elétrica, resistência à penetração e tensão de água na planta, ou seja, pegando como exemplo o aumento da tensão de água na planta na formação dos bulbilhos, há redução da produtividade. Analisando os resultados das relações inversas do superbrotamento do alho e as resistências a penetração, observamos que quanto maior a resistência à penetração implicará menor porcentagem de superbrotamento do alho.

Os coeficientes de determinação espacial (r^2), foram os seguintes: PG = f(CE) (0,804), PG = f(RP1) (0,961), PG = f(RP2) (0,882), PG = f(RP3) (0,754), PG = f(RPM) (0,935), PG = f(SHA) (0,701), SU = f(RP1) (0,896), SU = f(RP2) (0,821), SU = f(RP3) (0,710) e SU = f(RPM) (0,762), superiores a 0,700. Assim, houve correlações lineares significativas entre a PR e SU e os demais atributos, com satisfatórios ajustes semivariográficos. Portanto, analisando a Tabela 2, pode-se inferir, que resistência à penetração se apresentou como bom indicador da produtividade e do superbrotamento do alho em solo argilo-arenoso.

Quando analisamos os mapas de cokrigagem, Figuras 4a, 4b, 4c, 4d, 4e e 4f, entre a produtividade do alho em função de CE, RP1, RP2, RP3, RPM e SHA, respectivamente, observamos que as regiões do norte dos mapas foram os locais onde houve produtividades de média a alta, enquanto os pontos distribuídos na parte central e sul apresentaram as menores produtividades.

As análises dos mapas de cokrigagem, Figuras 5a, 5b, 5c e 5d, do superbrotamento em função das resistências à penetrações, mostram claramente maiores porcentagens de

superbrotamento no norte do mapa, enquanto a parte sul mostrou menor porcentagem da anomalia estudada.

7.4 Conclusão

A produtividade média do alho foi de 10.351,0 kg ha⁻¹, estando dentro dos valores encontrados em alho irrigado com alta tecnologia.

Quanto menor a resistência à penetração, maior será a produtividade do alho.

Os atributos produtividade do alho (PR), condutividade elétrica (CE), resistência mecânica à penetração (RP1, RP2, RP3, RP4, RPM), umidade volumétrica (UV), tensão de água na planta (SHA) e superbrotamento (SU) apresentaram dependência espacial.

Os valores de alcance da dependência espacial a serem considerados em trabalhos futuros utilizando os mesmos atributos deverão estar compreendidos entre 8 metros para condutividade elétrica e 23 metros para resistência à penetração.

Do ponto de vista espacial, o superbrotamento do alho pôde ser estimado por meio da cokrigagem indireta com resistência à penetração. Assim, valores superiores a 3.000 kPa desse atributo do solo indicaram sítios com as mais baixas produtividades.

7.5 Referências

ARAÚJO, E. G., CORRÊA, A. R., LIMA, D. C. D. O. S., DE PIERI PRANDO, E., SENA, K. N., MONTANARI, R., & DA SILVA, R. M. Análise espacial da condutividade elétrica e atributos físico-químicos de um Latossolo. **Agrarian**, 9(31), 73-83. 2016.

CORTEZ J.W., OLSZEWSKI N., PIMENTA W.A., PATROCÍNIO FILHO A.P., SOUZA E.B., NAGAHAMA H.J. Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um Argissolo Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 38(3):1000-1010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000300032>. 2014.

CORTEZ, J. W., MATOS, W. P. D. S., ARCOVERDE, S. N., CAVASSINI, V. H., & VALENTE, I. Q. Spatial variability of soil resistance to penetration in no tillage system. **Engenharia Agrícola**, 38(5), 697-704. 2018.

DALCHIAVON, F. C., CARVALHO, M. P., MONTANARI, R., ANDREOTTI, M., BEM, E. A. D. Inter-relações da produtividade de cana soca com a resistência à penetração, umidade e matéria orgânica do solo, **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, n.2, p. 255-264, mar/abr, 2014.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola- LSPA**. Novembro 2018. Brasília. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura>> acesso em 28/12/2018.

LIMA, E. S., MONTANARI, R., LOVERA, L. H., TEIXEIRA FILHO, M. C. M., DA SILVA, V. E., & DA ROCHA LIMA, C. G. Spatial variability of eucalyptus and physical attributes of soil fertilized with lime mud and mineral fertilizer. *Brazilian Journal of Agriculture-Revista de Agricultura*, 92(2), 132-146. 2017.

LOPES, K. A. L., DOS SANTOS AGUIAR, F. I., DE OLIVEIRA, I. R., DANTAS, J. S., & DA SILVA, G. B. Variabilidade espacial da condutividade elétrica de um solo coeso relacionada com argila. *Revista Unimar Ciências*, 26(1-2). 2017.

MACÊDO, F. S., DE SOUZA, R. J., & PEREIRA, G. M. Controle de superbrotamento e produtividade de alho vernalizado sob estresse hídrico. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(4), 629-635. 2006.

MACHADO, F. C., MONTANARI, R., SHIRATSUCHI, L. S., LOVERA, L. H., & LIMA, E. D. S. Spatial dependence of electrical conductivity and chemical properties of the soil by electromagnetic induction. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(4), 1112-1120. 2015.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L.M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. *Engenharia Agrícola*, v.31, n.1, p.90-101, 2011.

MONTANARI R., PANACHUKI, E., LOVERA, L. H., CORREA, A. R., OLIVEIRA, I. S., QUEIROZ, H. A., TOMAZ, P. K. Variabilidade Espacial da Produtividade de Sorgo e de Atributos do Solo na Região do Ecótono Cerrado-Pantanal, MS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39:385-396, 2015.

MAROUELLI, W. A.; BRAGA, M. B.; LUCINI, M. A.; RESENDE, F. V. Circular Técnica 136: Irrigação na cultura do alho. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Embrapa*, Brasília-DF. 24 P, 2014.

OLIVEIRA, R. A.; RAMOS, M. M. **Manual do irrigâmetro**. Viçosa, MG: UFV, 144 p. 2008.

PRATO SARMIENTO, A. I. Avaliação financeira do alho (*Allium sativum* L.) roxo Nacional e Peruano no planalto Cundiboyacense, Colômbia. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*; Vol. 17, Núm. 1; 43-53. 2016.

PUIATTI, M. Exigências climáticas e ecofisiologia do alho. In: Nick, C. e Borém, A. (Ed.). **Alho: do plantio à colheita**: Viçosa-MG: Editora UFV, 2017.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysys of variance test for normality: complete samples. *Biometrika*, London, v.52, p.591-611, 1965.

VALADÃO F.C.A, WEBER O.L., VALADÃO JÚNIOR D.D., SCARPINELLI A., DEINA F.R., BIANCHINI A. Adubação fosfatada e a compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 39(1):243-255. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20150144>. 2015.

WARRICK, A. W. Spatial variability of soil physical properties in the field. **Application of soil physics**. 319-344. 1980.

8. APÊNDICE

APÊNDICE A -. (a) área experimental; (b) coleta de amostras indeformadas do solo de 0 a 0,20 m

(a)



(b)



Fonte: O autor.

APÊNDICE B - (a) preparação do solo; (b) peneiramento do solo (c) saturação do solo; (d) determinação da Capacidade de campo do solo; (e) extrator de Richards pingando, e (f) Aneis com solo



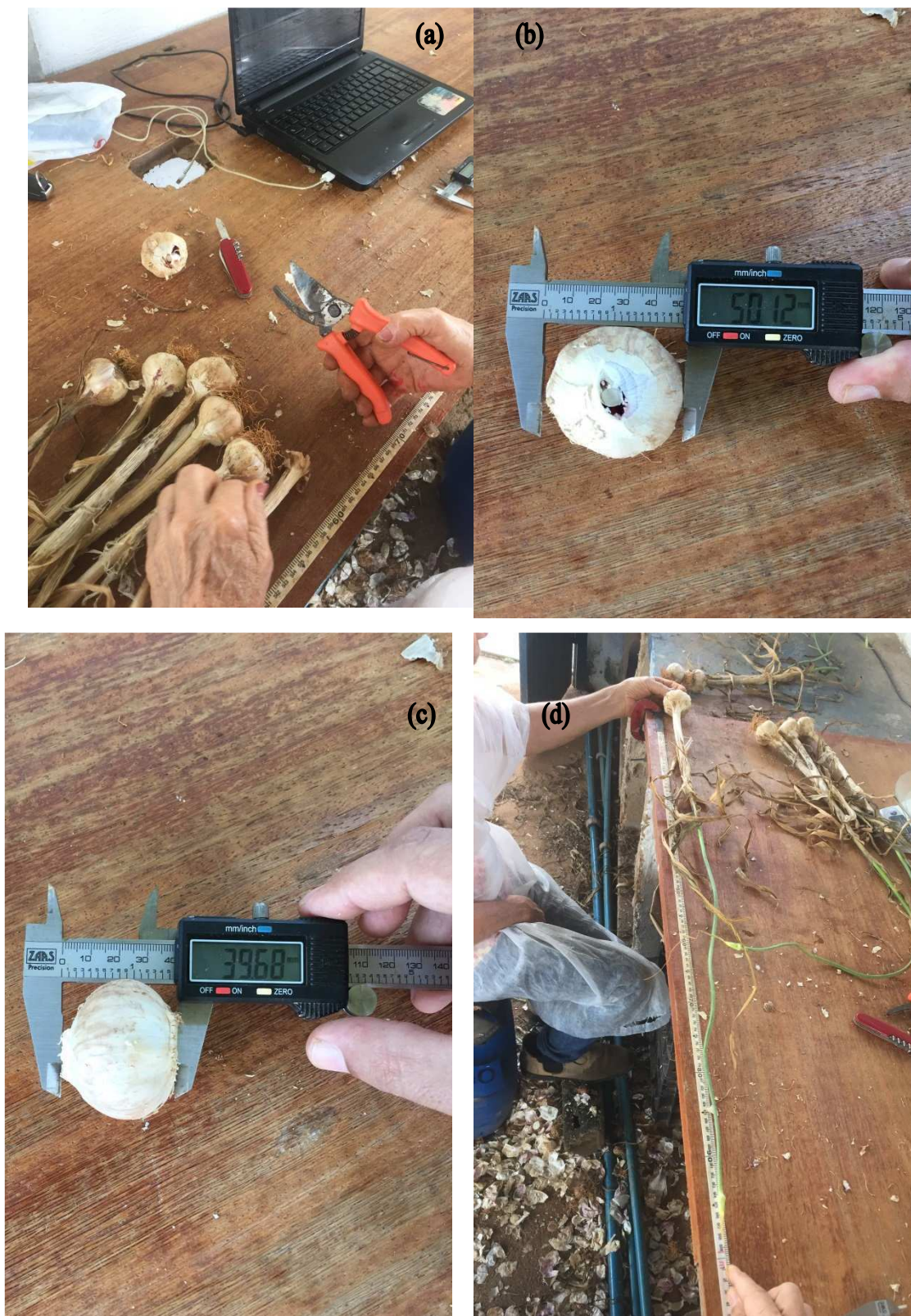
Fonte: O autor.

APÊNDICE C - (a) Aparelho Irga; (b) Aparelho Irga (c) Clorofilog; (d) determinação do índice de área foliar; (e) determinação do NDVI, e (f) determinação da condutividade elétrica do solo



Fonte: O autor.

APÊNDICE D - (a) determinação componentes produtivos da planta do alho; (b) diâmetro do bulbo, (c) altura do bulbo (d) comprimento do pendão floral



Fonte: O autor.

APÊNDICE E - (a) orvalho na planta do alho; (b) alho colhido secando no galpão, (c) alho colhido e secando ao ar (d) alho colhido secando no galpão



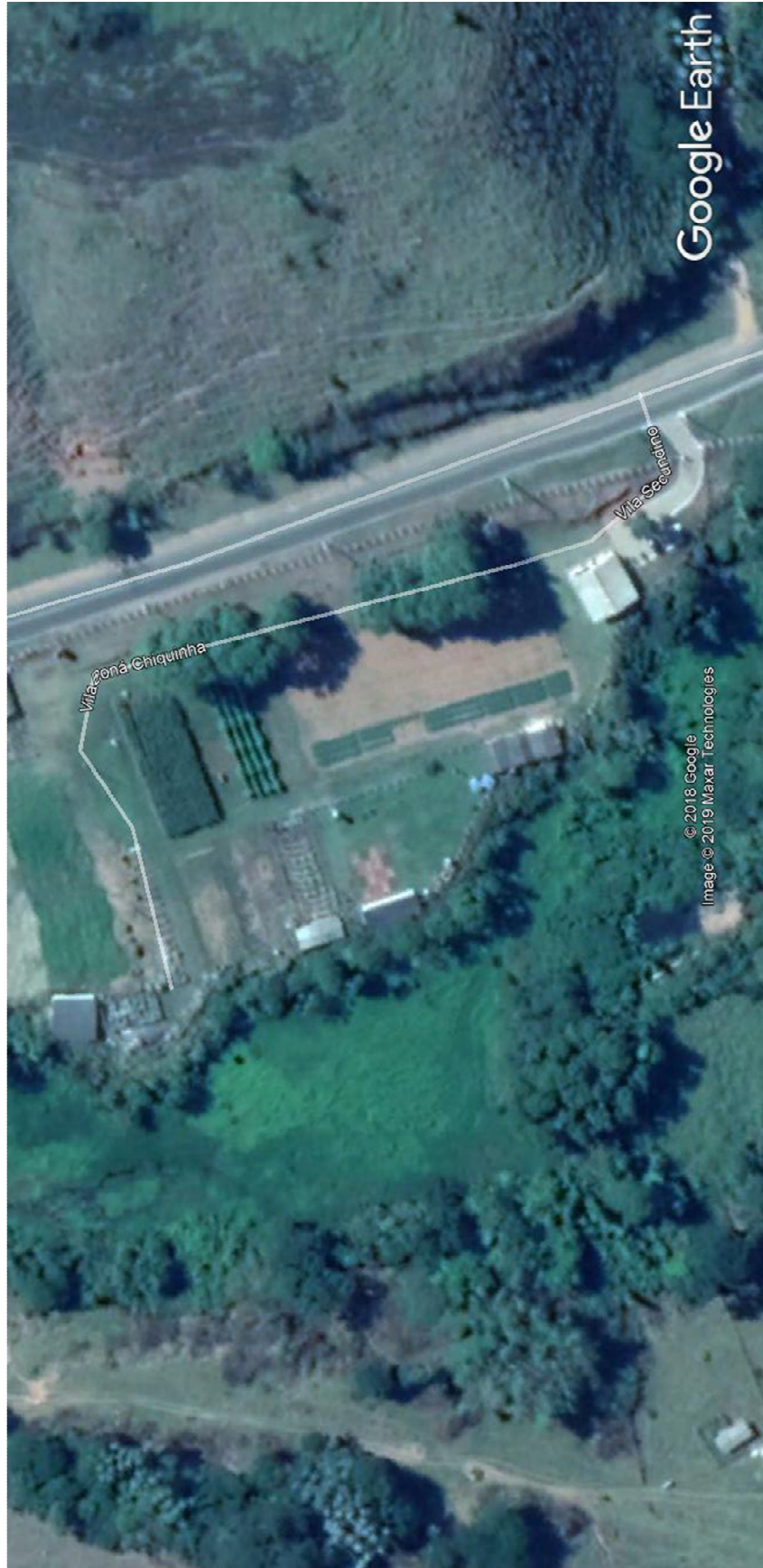
Fonte: O autor.

APÊNDICE F - Planta completa do alho



Fonte: O autor.

APÊNDICE G – Vista aérea da área do experimento.



Fonte: O autor.