



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO  
TOCANTINS *CAMPUS* ARAGUATINS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÔNOMICA**

**RICARDO FERREIRA BRAUNA**

**CORREÇÃO ESPACIAL EM ANÁLISES DE HÍBRIDOS DE MILHO NO  
MUNICÍPIO DE DARCIÓPOLIS – TO**

ARAGUATINS

2025

**RICARDO FERREIRA BRAUNA**

**CORREÇÃO ESPACIAL EM ANÁLISES DE HÍBRIDOS DE MILHO NO  
MUNICÍPIO DE DARCINÓPOLIS – TO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação do Curso Superior de Bacharelado  
em Engenharia Agrônoma da Unidade  
Araguatins, do Instituto Federal do Tocantins,  
como exigência à obtenção do título de Bacharel(a)  
em Engenharia Agrônoma.

**Orientador:** Marcio Rogerio Pereira Leite

ARAGUATINS

2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Bibliotecas do  
Instituto Federal do Tocantins**

---

B825c Brauna, Ricardo Ferreira.  
Correção espacial em análises de híbridos de milho no  
município de Darcinópolis -TO / Ricardo Ferreira Brauna. –  
Araguatins, TO, 2025.  
22 p. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia  
Agrônômica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia  
do Tocantins - IFTO, Araguaatins, TO, 2025.

Orientador: Me. Marcio Rogério Pereira Leite.

1. Análise espacial. 2. Variância. 3. Variograma. I. Leite, Marcio  
Rogério Pereira. II. Título.

**CDD 630**

---

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que  
citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).



Ministério da Educação  
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica Instituto  
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins  
*Campus Araguatins*  
Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Agrônoma

### FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “CORREÇÃO ESPACIAL EM ANÁLISES DE HÍBRIDOS  
DE MILHO NO MUNICÍPIO DE DARCINÓPOLIS – TO”

AUTOR: **Ricardo Ferreira Brauna**

ORIENTADOR: **Me. Márcio Rogério Pereira Leite**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia do  
Tocantins, *Campus Araguatins*, como  
parte das exigências para a conclusão  
do Curso de Bacharelado em  
Engenharia Agrônoma.

Aprovado em 05 de junho de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Rogerio Pereira Leite, Servidor**, em 05/06/2025, às 09:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Roberta de Freitas Souza Lobo, Servidora**, em 05/06/2025, às 09:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Decio Dias dos Reis, Servidor**, em 05/06/2025, às 09:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site  
[http://sei.iftoc.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.iftoc.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0),  
informando o código verificador **2784493** e o código  
CRC **75A970F2**.

## DEDICATÓRIA

Ao meu pai que me ensinou os princípios que devo seguir para ser um homem digno e de valor, a minha mãe, que sempre me incentivou a buscar estudo e conhecimento para alcançar meus sonhos e objetivos. Dedico também a minha mulher dona Laís que confia em mim para ser o provedor da nossa família e ao meu filho que está em seu ventre, meu Rafael que vem ao mundo com a benção de Deus no mês que vai ser realizado a defesa desse TCC.

Aos meus avós que sempre me cobraram e incentivaram a buscar estudo e nos ajudaram de todas as formas ao longo da vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me colocado em uma família tão carinhosa e trabalhadora, por tudo que tem feito em minha vida, me abençoando com saúde para trabalhar, me cercado com pessoas boas ao longo da minha trajetória. Agradeço do fundo do meu coração aos meus pais, que me criaram com princípios que quero transmitir para os meus filhos e em especial ao meu Rafael que está a caminho. Pai obrigado pelas vezes que me levou pra escola nos nossos carros velhos e cheio de gambiarras me ensinando a dar valor naquilo que é conquistado com nosso suor, me ensinou a cumprimentar e servir as pessoas em qualquer lugar que eu chegue. Mãe, obrigado por me fazer entender que o estudo abre portas, mas que a organização pessoal e financeira que vai me trazer a realização dos meus objetivos, a senhora e o meu pai merecem um retorno por tudo que fizeram por mim e esse é um pouquinho dele, amo muito vocês e sou grato por tudo, sei que nunca vou quitar essa dívida, mas quero sempre honrar todo o esforço que fizeram por mim.

Obrigado Laís, meu amor você me faz sonhar mais alto e acreditar mais em mim do que eu mesmo, essa etapa é mais uma etapa que estamos passando juntos de muitas que virão, obrigado por você está realizando o meu maior sonho, ser pai. Agradeço a Deus por ter colocado você na minha vida e por ter me abençoado com um rapaz perfeito e saudável, o qual quero presentear sendo um homem melhor, ensinando-o através do exemplo que a determinação, a disciplina torna o sonho de qualquer pessoa em realidade, mas isso só tem valor se for alcançado junto com as pessoas que amamos. Pai, mãe, meus irmãos e sobrinhos, minha mulher e meu filho amo vocês do fundo do meu coração e agradeço por fazerem parte da minha vida, prometo que essa é mais uma conquista, e que muitas outras virão ao longo de nossas vidas.

Agradeço aos meus avós paternos que apesar de não estarem mais na minha vida, fazem parte de quem eu sou, queria muito que vocês estivessem aqui, mas sei que Deus deu o descanso merecido para esse casal tão trabalhador, minha vozinha Maria e meu vozão João, amo vocês.

Agradeço aos meus avós maternos que estão comigo a vida inteira, ajudando a construir quem sou hoje, desde as madrugadas geladas em que íamos para a feira até a ajuda nos dias de hoje, obrigado vô Divino e vó Gaída, amo vocês. Obrigado pelas lições e por me mostrar o valor do suor do rosto.

## **EPIGRAFE**

*“O verdadeiro trabalho é invisível. Seu desempenho importa mais ainda quando ninguém está olhando.”*

David Goggins

## RESUMO

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura de importância mundial, cultivada há mais de 8000 anos, notável por sua ampla adaptabilidade e versatilidade, que a torna fundamental tanto para a alimentação humana quanto para a animal, devido às suas elevadas qualidades nutricionais. Essa longa trajetória de cultivo ressalta não apenas o valor econômico e cultural do milho, mas também sua relevância na pesquisa agrônômica e no desenvolvimento de tecnologias que visam aumentar sua produtividade e sustentabilidade. A compreensão da variabilidade espacial das propriedades do ambiente é crucial para a realização de estudos precisos e eficazes. Essa análise fornece subsídios para a escolha adequada da área experimental, orientando a disposição e localização das unidades de amostragem, o que é essencial para garantir a representatividade dos dados coletados. Além disso, o estudo da variabilidade espacial contribui significativamente para o mapeamento e a classificação dos solos, permitindo um manejo mais eficiente e o uso racional dos insumos, como fertilizantes, o que pode otimizar a produtividade e minimizar impactos ambientais. Neste trabalho, o objetivo foi avaliar a variabilidade espacial em um experimento realizado com híbridos simples de milho. Para isso, foram comparadas as estimativas obtidas por um modelo espacial, que incorpora informações sobre a dependência e correlação dos dados no espaço, com as de um modelo base, que ignora tais informações. Essa comparação visa identificar a eficácia dos modelos espaciais na captura de erros decorrentes da variabilidade natural do ambiente experimental. Mesmo quando os princípios de experimentação são rigorosamente aplicados, a variabilidade espacial pode introduzir erros que comprometem a precisão dos resultados. Portanto, a incorporação de análises espaciais torna-se imprescindível, especialmente em condições de alta adubação, onde a heterogeneidade do solo e outras variáveis ambientais podem influenciar significativamente o desempenho dos híbridos de milho. Dessa forma, a utilização de modelos estatísticos que consideram a estrutura espacial dos dados não só aprimora a acurácia das estimativas, como também aumenta a confiabilidade dos resultados, contribuindo para decisões mais embasadas e eficientes no manejo agrícola. Os resultados evidenciam que a incorporação da estrutura espacial nos modelos de análise é fundamental para aprimorar a precisão na avaliação de híbridos de milho. Ao considerar a variabilidade natural do ambiente experimental, o modelo com informações espaciais demonstrou maior capacidade para corrigir erros decorrentes de heterogeneidades no solo, garantindo estimativas mais robustas e confiáveis.

**Palavras-chave:** *Zea mays* L. Análise espacial. Variância. Variograma.

## ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) is a crop of global importance, cultivated for over 8,000 years and renowned for its broad adaptability and versatility, which make it essential for both human and animal consumption due to its high nutritional qualities. This long history of cultivation highlights not only the economic and cultural value of maize but also its significance in agronomic research and in the development of technologies aimed at increasing its productivity and sustainability. Understanding the spatial variability of environmental properties is crucial for conducting precise and effective studies. This analysis provides the foundation for selecting the appropriate experimental area by guiding the arrangement and location of sampling units, which is essential to ensure that the collected data are representative. Moreover, studying spatial variability significantly contributes to soil mapping and classification, enabling more efficient management and the rational use of inputs such as fertilizers, ultimately optimizing productivity and minimizing environmental impacts. In this work, the objective was to evaluate the spatial variability in an experiment conducted with simple maize hybrids. To achieve this, estimates obtained from a spatial model which incorporates information about the dependency and correlation of data in space were compared with those from a baseline model that ignores such information. This comparison aims to assess the effectiveness of spatial models in capturing errors that arise from the natural variability of the experimental environment. Even when experimental principles are rigorously applied, spatial variability can introduce errors that compromise the precision of the results. Therefore, incorporating spatial analyses becomes indispensable, especially under conditions of high fertilization, where soil heterogeneity and other environmental variables can significantly influence the performance of maize hybrids. In this way, the use of statistical models that consider the spatial structure of the data not only improves the accuracy of the estimates but also increases the reliability of the results, thereby contributing to more well-founded and efficient decisions in agricultural management. The results demonstrate that incorporating spatial structure into the analysis models is fundamental for enhancing the precision in evaluating maize hybrids. By accounting for the natural variability of the experimental environment, the spatial model showed a greater ability to correct errors arising from soil heterogeneities, ensuring more robust and reliable estimates.

**Keywords:** *Zea mays* L. Spatial analysis. Variance. Variogram.

## SUMÁRIO

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                               | <b>10</b> |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                   | <b>11</b> |
| <b>3. METODOLOGIA.....</b>                              | <b>12</b> |
| <b>3.1 Caracterização da área experimental .....</b>    | <b>12</b> |
| <b>3.2 Delineamento e condução do experimento .....</b> | <b>13</b> |
| <b>3.3 Caracterização fenotípica.....</b>               | <b>13</b> |
| <b>3.4 Análise e modelo estatístico.....</b>            | <b>13</b> |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                   | <b>14</b> |
| <b>5. CONCLUSÃO .....</b>                               | <b>18</b> |
| <b>REFRÊNCIAS .....</b>                                 | <b>19</b> |

## LISTA DE TABELAS E FIGURAS

**Tabela 1 – Resumo da análise de variância, estimativas de média de tratamentos e do coeficiente de variação experimental (CV%) para produtividade (Kg/ha<sup>-1</sup>) em híbridos simples de milho em Darcinópolis – TO ..... 14**

**Figura 1 – Gráficos de diagnóstico dos resíduos do MOD1 (sem correção espacial) para produtividade (Kg/ha<sup>-1</sup>) em híbridos simples de milho em Darcinópolis – TO ..... 15**

**Figura 2 – Gráficos de diagnóstico dos resíduos do MOD2 (com correção espacial AR1 x AR1) para produtividade (Kg/ha<sup>-1</sup>) em híbridos simples de milho em Darcinópolis – TO ..... 16**

**Figura 3 – Superfície tridimensional da variância residual em função dos lags de linha e coluna (MOD2 AR1 x AR1) para produtividade (Kg/ha<sup>-1</sup>) em híbridos simples de milho em Darcinópolis – TO ..... 17**

## 1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma espécie cultivada há mais de 8000 anos com uma grande adaptabilidade e que serve a alimentação humana e animal, devido às suas elevadas qualidades nutricionais (GALVÃO et al., 2014). O milho é considerado uma das espécies mais versáteis do mundo, devido a sua gama de aplicação, em todas as cadeias de produção. É uma cultura cultivada nas épocas de verão e outono e associada à produção de silagem e grãos, contribuindo com enorme potencialidade produtiva à agricultura. A cultura do milho é uma das que ocupam maior área no mundo, juntamente do o trigo e o arroz, as três culturas com maior expressão global (FAO, 2023).

O Brasil é o terceiro maior produtor de milho do mundo, com estimativas para a safra 2023/2024 de 122 milhões de toneladas métricas (USDA, 2024). A Companhia Nacional do Abastecimento (CONAB) reportou uma produção de aproximadamente 100 milhões de toneladas de milho, com crescimento de 20,9% em comparação a 2021 (CONAB, 2023), ou seja, se trata de uma cultura em ascensão. O Estado do Tocantins (TO) desempenha um papel significativo na produção brasileira de milho, respondendo por 8,67% da primeira safra nacional (Conab, 2024). Isso evidencia a importância do milho para a região e ressalta a necessidade de estratégias eficazes de melhoramento genéticos adaptados às condições locais.

A análise de variância constitui um instrumento essencial na comparação entre tratamentos experimentais. No entanto, sua aplicabilidade e confiabilidade estão condicionadas ao cumprimento de pressupostos estatísticos fundamentais. Entre eles, destaca-se a exigência de que os efeitos dos tratamentos e os fatores ambientais sejam aditivos, bem como a necessidade de que os erros experimentais sejam independentes, homocedásticos e distribuídos normalmente (CRUZ, 2013). Diante disso, torna-se imprescindível garantir a homogeneidade e a independência das unidades experimentais. A violação desses pressupostos pode comprometer seriamente a interpretação dos dados, conduzindo a conclusões equivocadas e comprometendo a validade das inferências realizadas.

Considera-se que um conjunto de dados segue uma distribuição normal quando há proximidade entre os valores da média aritmética, da mediana e da moda (LITTLE & HILLS, 1978). A mediana representa o ponto central da distribuição, sendo o valor que ocupa a posição intermediária após a ordenação crescente dos dados. Já a moda corresponde ao valor mais frequentemente observado no conjunto. Além disso, características adicionais de uma distribuição normal incluem um coeficiente de assimetria próximo de zero e um coeficiente de curtose em torno de três (SNEDECOR & COCHRAN, 1974). No entanto, é importante observar

que determinados softwares estatísticos adotam métodos distintos para o cálculo da curtose, o que pode resultar em um valor próximo de zero, em vez de três.

A análise espacial configura-se como uma ferramenta fundamental para a análise da variabilidade espacial, ao possibilitar a interpretação dos resultados com base na estrutura natural de variação dos atributos avaliados e na existência de dependência espacial dentro do intervalo amostral. Essa abordagem pode ser empregada tanto em extensas áreas que compreendem distintos tipos de solos (BERG & KLAMT, 1997; COUTO et al., 2000), quanto em regiões de menor escala (ALBUQUERQUE et al., 1996; SOUZA et al., 1998; OLIVEIRA et al., 1999; BERTOLANI & VIEIRA, 2001).

Diversas pesquisas voltadas às características físicas e químicas do solo, bem como às propriedades das plantas, têm evidenciado que a variabilidade desses atributos não ocorre de forma aleatória, mas sim com expressiva correlação ou dependência espacial (OLIVEIRA et al., 1999; SOUZA et al., 1998; ALBUQUERQUE et al., 1996). Nesse sentido, compreender a dinâmica dessa variabilidade espacial torna-se fundamental para a delimitação apropriada de áreas e unidades experimentais, assegurando a independência das variáveis analisadas e viabilizando a aplicação adequada dos testes estatísticos.

O estudo da variabilidade espacial das propriedades do ambiente é de suma importância, pois subsidia não apenas a seleção da área experimental, a disposição e a localização das unidades de amostragem, assim como a coleta e a interpretação dos dados, mas também contribui significativamente para o mapeamento e a classificação dos solos. Ademais, esse conhecimento é essencial para a formulação de estratégias voltadas ao uso eficiente e racional de fertilizantes, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e economicamente viáveis. Com isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial de um experimento com híbridos simples de milho, afim de verificar as estimativas do modelo espacial e compara-lo com um modelo base, que é realizado sem o uso de nenhuma informação espacial.(PERGUNTAR PARA O JOÃO SE TEM QUE MUDAR)

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Embora os delineamentos experimentais sejam projetados para reduzir parte da heterogeneidade intrínseca do solo nas áreas de cultivo, é comum que persistam variações espaciais em pequena escala. Essas flutuações podem resultar de práticas operacionais não uniformizadas, efeitos de bordadura, gradientes ambientais ou de limitações na randomização local dos tratamentos (BURGUEÑO, 2018; RESENDE e STURION, 2003). Tais fontes não

controladas de erro interferem diretamente na resposta fenotípica das plantas, dificultando a distinção entre efeitos genéticos e ambientais e, conseqüentemente, comprometendo a acurácia do processo seletivo.

Nesse contexto, a modelagem espacial emerge como uma ferramenta estatística robusta para lidar com essa variabilidade residual. A incorporação das coordenadas das parcelas no grid experimental permite a utilização de modelos com estrutura autorregressiva de primeira ordem (AR1) para linhas e colunas (GILMOUR et al., 1997; GLEESON e CULLIS, 1987). Essa abordagem é particularmente eficaz para captar dependências espaciais locais, partindo do pressuposto de que parcelas adjacentes tendem a apresentar comportamentos semelhantes em razão da continuidade do ambiente e do solo. Adicionalmente, variações sistemáticas e tendências de maior escala, frequentemente relacionadas a operações de campo, podem ser contempladas por meio da inclusão de efeitos fixos e aleatórios baseados na localização das parcelas (GILMOUR et al., 1997).

A adoção de modelos espaciais tem se mostrado vantajosa para aprimorar a qualidade das análises, pois contribui para reduzir o viés na estimativa dos efeitos genotípicos e aumenta a acurácia preditiva. Ao considerar as correlações entre parcelas vizinhas, esses modelos permitem uma separação mais precisa entre os componentes genéticos e os efeitos ambientais residuais, tornando o processo de seleção mais confiável (DUARTE e VENCOSKY, 2005). Dessa forma, a modelagem espacial atua como um complemento valioso aos delineamentos experimentais convencionais, sendo particularmente relevante em culturas de alto valor econômico, nas quais a precisão das estimativas genéticas é determinante para o avanço do melhoramento.

Diversos estudos já evidenciaram os benefícios da aplicação de modelos espaciais em culturas como cevada (SMITH, CULLIS, THOMPSON, 2001), algodão (LIU et al., 2015), tremoço (STEFANOVA et al., 2009), milho (ARIEF et al., 2019), ervilha (COWLING et al., 2015), batata (ANDRADE et al., 2020), soja (BERNARDELI et al., 2021) e trigo (BORGES et al., 2019; STEFANOVA et al., 2009). Apesar desses avanços, observa-se uma lacuna no que diz respeito à aplicação sistemática dessa abordagem no contexto da experimentação.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1 Caracterização da área experimental**

O experimento foi conduzido na região de Darcinópolis – TO na chácara Bom Jesus. A localização apresenta precipitação média anual de 1.500 mm, altitude de 240 m e temperatura média de 28,5°C (INMET, 2017). O clima característico da região, segundo o sistema de

classificação de Köppen-Geiger, é caracterizado como Aw, ou seja, clima tropical com estações secas no inverno. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, a área experimental apresenta solo argiloso.

No plantio, foi utilizado adubação de fundação com minerais isolados, sendo eles: ureia 45% (fonte de N), o superfosfato simples 18% (fonte de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e o cloreto de potássio 56% (fonte de K<sub>2</sub>O). De acordo com a 5ª aproximação de recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Para a adubação de cobertura, foi realizada 30 e 25 dias após a emergência com o adubo formulado 20-00-20, com uma dose de aproximadamente 350 kg/ha. Todas as pragas e controle de plantas daninhas foi realizado a fim de se ter uma melhor condução do experimento, bem como uma representatividade do real potencial dos híbridos.

### **3.2 Delineamento e condução do experimento**

O experimento foi instalado segundo o delineamento em alpha lattice??, composto por 45 tratamentos (híbridos de milho) com três repetições, totalizando 135 parcelas. Cada parcela consistiu em 2 fileiras de 3 metros, sem bordadura, com espaçamento de 0,90 m entre as fileiras. O espaçamento entre as plantas foi ajustado para atingir uma população aproximada de 70.000 plantas/ha, e as sementes foram semeadas a uma profundidade de 3 a 5 cm. O manejo de pragas, doenças e plantas daninhas seguiu as recomendações para a cultura do milho (EMBRAPA, 2015).

### **3.3 Caracterização fenotípica**

Na área útil de cada parcela, foram avaliados os grãos que apresentaram uma média de umidade relativa em torno de 14%. Essa medição foi realizada com o auxílio de um medidor elétrico 12V de umidade dos grãos, modelo CQM20142, da John Deere, considerado uma ferramenta adequada para aferir essa característica. Após a determinação do ponto de colheita, as espigas foram debulhadas e pesadas com o auxílio de uma balança semi-analítica, permitindo o cálculo da produtividade em kg/ha. A área útil foi colhida integralmente e a produtividade foi extrapolada para a unidade em questão, a fim de prosseguir com as análises estatísticas.

### **3.4 Análise e modelo estatístico**

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA). Todas as análises estatísticas foram conduzida no ambiente estatístico R, versão 4.3.1 (R CORE TEAM, 2023). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância conforme o modelo estatístico:

$$Y_{ij} = \mu + X_i + Z_j + e_{ij}$$

em que:  $y_{ij}$  é a observação do  $i$ -ésimo tratamento no  $j$ -ésimo bloco;  $\mu$  é a média geral;  $g_i$  é o efeito aleatório do genótipo  $i$ ;  $e_{ij}$  é o resíduo aleatório do  $i$ -ésimo genótipo no  $j$ -ésimo bloco, com  $e_{ij} \sim N(0, \sigma_e^2)$ .

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo da análise de variância (ANOVA) pelo modelo de blocos casualizados (DBC), com estimativas do quadrado médio do tratamento, resíduo, média geral e coeficiente de variação experimental (CV%) das respectivas características é apresentado na Tabela 1. É descrito as estimativa dos dois modelos da ANOVA, sendo o segundo considerando as informações de linha e coluna para melhorar as estimativas do modelo, tornando ele mais condizente com a realidade. Uma vez que, por ajustar os resíduos por meio de modelagem espacial, torna mais fidedigno.

O coeficiente de variação experimental (CV%) é uma medida relativa da dispersão dos dados e é bastante útil para comparar a precisão entre tratamentos ou características. Os valores do coeficiente de variação experimental CV% variaram de 8.95 a 9% para o MOD1 e MOD2 respectivamente (Tabela 1). De acordo com Pimentel Gomes (1985) os CVs% obtidos na experimentação agrícola podem ser classificados em baixo (menor ou igual à 10%), médio (entre 10 e 20%), alto (entre 20 e 30%) e muito alto (maior que 30%). Assim, os dois modelos apresentaram coeficientes baixo. Quanto menor o valor do CV%, maior a precisão experimental.

**Tabela 1** – Resumo da análise de variância, estimativas de média de tratamentos e do coeficiente de variação experimental (CV%) para produtividade (Kg/ha<sup>-1</sup>) em híbridos simples de milho em Darcinópolis – TO

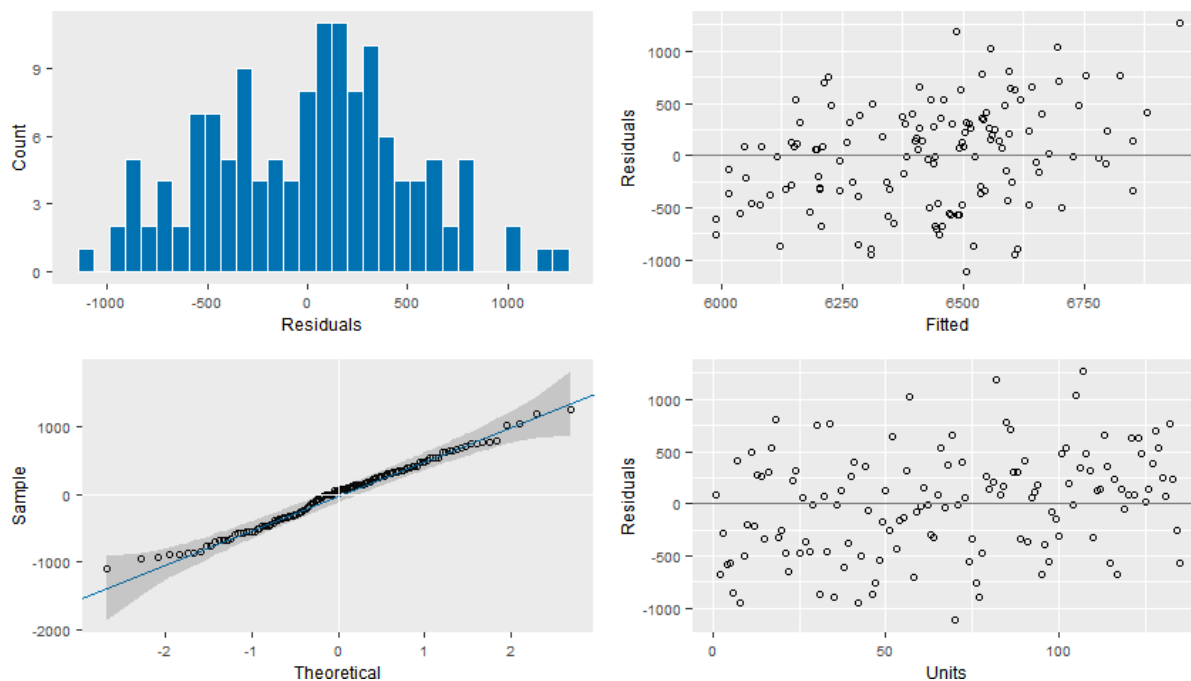
| Modelos | Genótipo    | Resíduo   | Média   | CV%  |
|---------|-------------|-----------|---------|------|
| MOD1    | 51002.67**  | 280091.19 | 6428.58 | 8.95 |
| MOD2    | 638991.00** | 270.459   | 6428.58 | 9.00 |

\*\*, \* Significativo pelo teste F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup> Não significativo. MOD1 – sem análise espacial; MOD2 – com análise espacial.

Os gráficos de diagnóstico do MOD1 (Figure 1), sem correção espacial, mostram que os resíduos apresentam distribuição aproximadamente normal (conforme evidenciado pelo histograma e pelo QQ-plot) e não sugerem heterocedasticidade ou tendências sistemáticas no gráfico de resíduos versus valores ajustados (SMITH e THOMPSON, 2001). Além disso, não se observa um padrão de autocorrelação evidente quando os resíduos são plotados na ordem das observações, indicando que, nesse contexto, as suposições de normalidade e homocedasticidade dos erros estão sendo razoavelmente atendidas. Embora não tenha sido

aplicada correção espacial, a ausência de padrões marcantes nos resíduos sugere que o modelo está capturando boa parte da variabilidade dos dados, reforçando a adequação da abordagem adotada para este conjunto de informações (CULLIS, et al., 2006).

**Figura 1** – Gráficos de diagnóstico dos resíduos do MOD1 (sem correção espacial) para produtividade ( $\text{Kg/ha}^{-1}$ ) em híbridos simples de milho em Darcinópolis – TO



(a) o histograma dos resíduos, (b) o gráfico de resíduos versus valores ajustados (Fitted), (c) o gráfico QQ (Quantil-Quantil) dos resíduos e (d) o gráfico de resíduos versus a ordem das observações (Units)

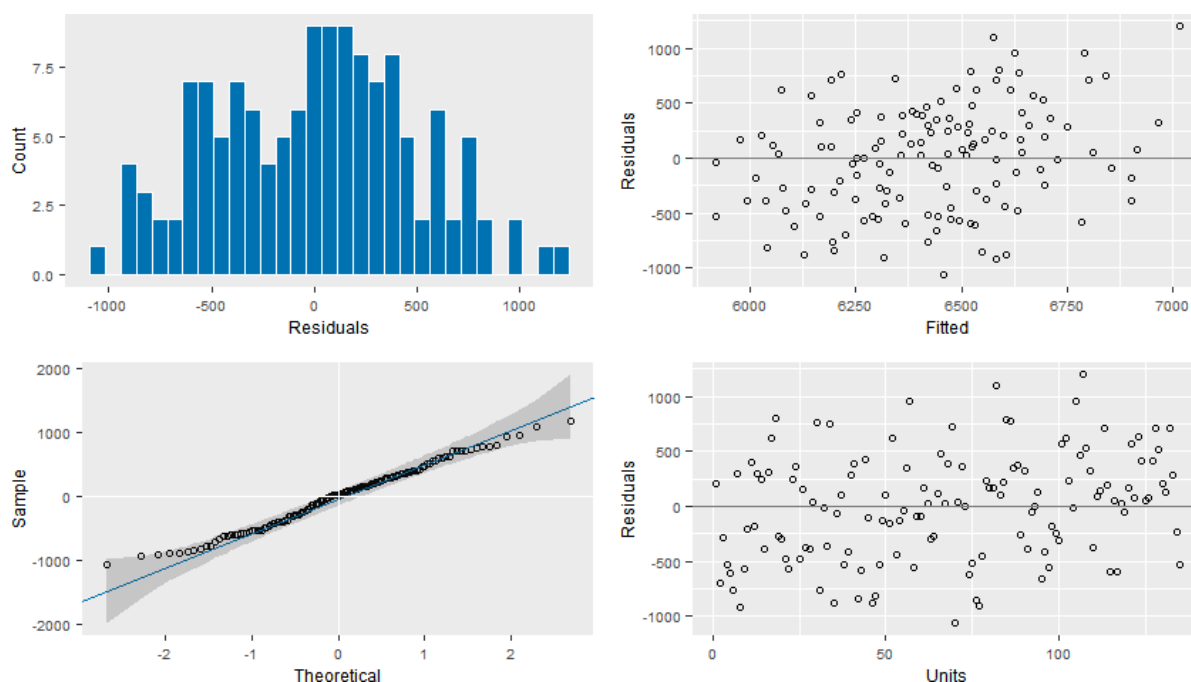
A incorporação da estrutura de correlação espacial AR1 x AR1 (Figura 2) aos mesmos dados resultou em resíduos que se mantêm próximos da distribuição normal (como indicado pelo histograma e pelo QQ-plot) e em um padrão mais aleatório nos gráficos de resíduos versus valores ajustados e resíduos versus ordem das observações. Esse comportamento sugere que o modelo espacial está capturando adequadamente a dependência entre as unidades amostrais, reduzindo possíveis vieses decorrentes de correlação não modelada. Além disso, a ausência de fortes padrões ou tendências nesses diagnósticos indica que os pressupostos de homocedasticidade e normalidade dos resíduos continuam satisfatórios, reforçando a adequação do modelo AR1 x AR1 para lidar com a dependência espacial presente nos dados.

Segundo Ramalho et al. (2012), o uso de maiores níveis de fertilizantes (altas adubações) em experimentos possibilita que as pequenas diferenças de fertilidade que existam sejam encobertas pela adubação usada. No entanto, a heterogeneidade do solo representa uma das principais fontes de erro experimental em avaliações de genótipos sob condições de campo (ANJOS, 2019). A desuniformidade de distribuição de água na irrigação é um importante fator

que contribui para aumento da heterogeneidade ambiental (RAMALHO et al., 2012). No entanto, mesmo com o uso adequado do princípio do controle local, através de uma escolha criteriosa do delineamento experimental, variações ambientais podem ocorrer entre unidades experimentais dentro de blocos (Figura 3 e 4, GRONDONA et al., 1996)

Em áreas com baixos níveis de fósforo, por exemplo, a variabilidade espacial da fertilidade do solo manifesta-se tanto em forma de manchas quanto de gradientes, gerando tendências que comprometem a independência dos resíduos. Mesmo em situações de alta adubação, onde se espera uma maior uniformidade da fertilidade, fatores como a distribuição desigual de água na irrigação ou de chuva, a competição entre genótipos e eventuais falhas na instalação do estande podem intensificar a heterogeneidade ambiental, promovendo a ocorrência de dependência espacial entre as parcelas.

Figura 2 – Gráficos de diagnóstico dos resíduos do MOD2 (com correção espacial AR1 x AR1) para produtividade ( $\text{Kg/ha}^{-1}$ ) em híbridos simples de milho em Darcinópolis – TO

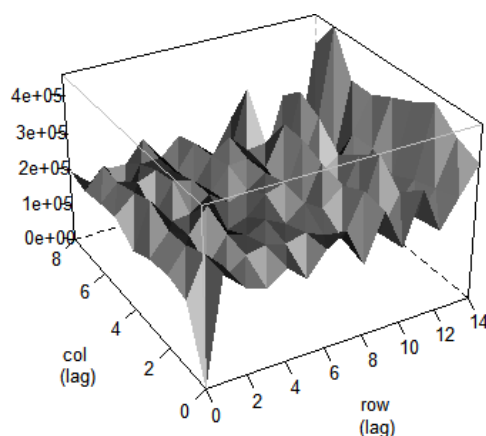


(a) o histograma dos resíduos, (b) o gráfico de resíduos versus valores ajustados (Fitted), (c) o gráfico QQ (Quantil-Quantil) dos resíduos e (d) o gráfico de resíduos versus a ordem das observações (Units)

A figura 3 é um gráfico tridimensional que ilustra como a variância (ou covariância) residual se distribui em função dos defasamentos (lags) nas direções de linha (row) e coluna (col). Observa-se a formação de uma superfície com picos e vales, indicando a presença de correlação espacial: em alguns níveis de lag, a variância residual se eleva, ao passo que em outros se reduz, sinalizando o comportamento da dependência espacial captada pelo modelo AR1 x AR1. Esse tipo de representação auxilia na visualização simultânea de como a variância

residual evolui conforme se aumenta a distância (lag) tanto em linhas quanto em colunas, evidenciando a adequação do modelo ao capturar estruturas de correlação no espaço.

Figura 3 – Superfície tridimensional da variância residual em função dos lags de linha e coluna (MOD2 AR1 x AR1) para produtividade ( $\text{Kg/ha}^{-1}$ ) em híbridos simples de milho em Darcinópolis – TO

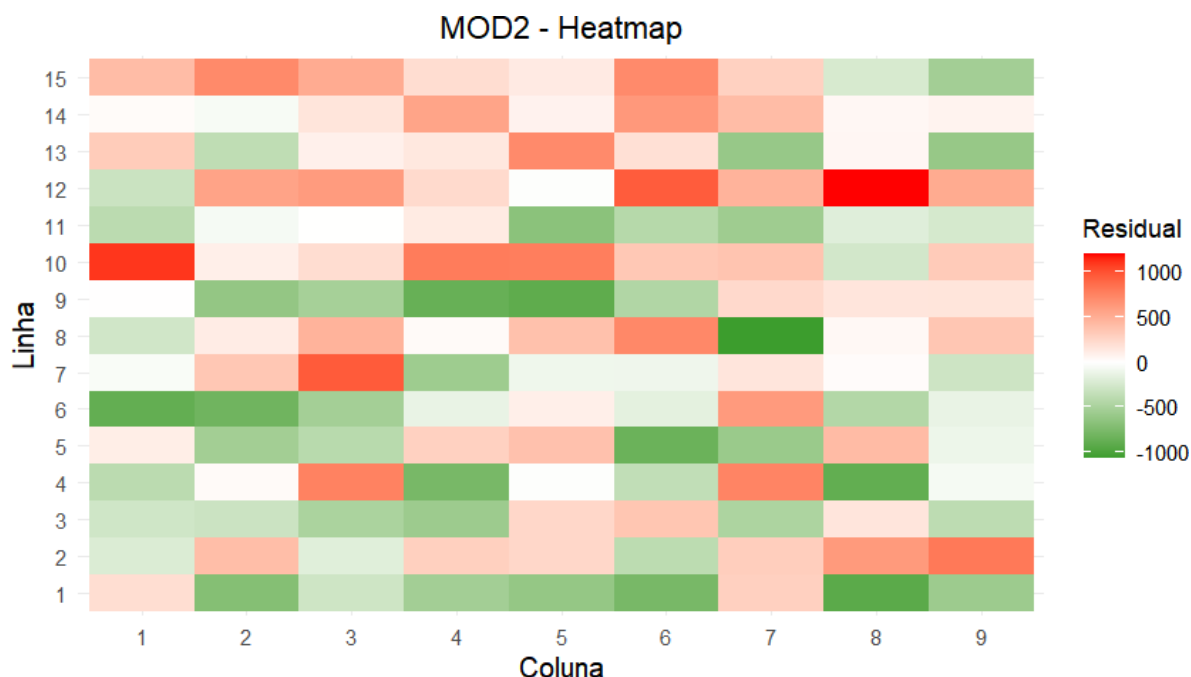


O eixo X representa o lag nas linhas (row), o eixo Y representa o lag nas colunas (col) e o eixo Z indica a magnitude da variância (ou covariância) residual estimada, evidenciando a estrutura de dependência espacial no experimento.

Na figura 4 exibe a distribuição espacial dos resíduos do MOD2, organizados pelas posições de linha (Linha) e coluna (Coluna) no experimento. As células em tons de verde indicam resíduos negativos (valores observados abaixo dos preditos), enquanto as células em tons de vermelho representam resíduos positivos (valores observados acima dos preditos). A intensidade da cor reflete a magnitude do desvio em relação ao valor ajustado pelo modelo, o que permite visualizar possíveis padrões de sobras e faltas ao longo da área experimental.

Nessa situação, a análise espacial usando modelos  $\text{AR1} \times \text{AR1}$  é capaz de considerar as autocorrelações residuais entre parcelas vizinhas, através da modelagem da matriz de covariância residual (GILMOUR et al., 1997). Assim, Borges et al. (2019) relatam que o desempenho de modelos estatísticos melhora quando se combina um delineamento experimental adequado e uma correção espacial. Anjos (2019), estudando modelos de análise de grãos de milho, considerou a avaliação de varios modelos e delineamentos, onde encontrou dois modelos consideraram o delineamento de blocos completos casualizados e resíduos independentes, sendo considerados os dois melhores modelos.

Figura 4 – Heatmap dos Resíduos do Modelo 2 (AR1 x AR1) da variância residual em função dos lags de linha e coluna (Modelo AR1 x AR1) para produtividade (Kg/ha<sup>-1</sup>) em híbridos simples de milho em Darcinópolis – TO



As linhas (eixo vertical) e colunas (eixo horizontal) representam a posição das parcelas no experimento; a escala de cores varia do verde (resíduos negativos) ao vermelho (resíduos positivos), com tons intermediários indicando menor intensidade dos desvios.

Na figura 4 representa o mapa de calor dos resíduos do MOD2, mesmo após a aplicação rigorosa dos princípios de experimentação, observam-se áreas onde os valores se acumulam acima (vermelho) ou abaixo (verde) do esperado, sugerindo a presença de tendências espaciais remanescentes. Essas variações podem indicar fatores de heterogeneidade do ambiente (como microvariações de fertilidade do solo, distribuição de água ou condições de estande) que não foram completamente controlados ou capturados. Assim, apesar da adoção de boas práticas experimentais, a análise espacial surge como uma ferramenta valiosa para modelar e corrigir essas dependências, contribuindo para estimativas mais precisas e confiáveis dos efeitos genotípicos.

## 5. CONCLUSÃO

Mesmo que os princípios de experimentação sejam rigorosamente aplicados, erros decorrentes da variabilidade espacial podem persistir. Assim, mesmo em condições de alta adubação, os ensaios de híbridos de milho devem incorporar análises espaciais na seleção dos modelos estatísticos, a fim de capturar e corrigir essas fontes de erro, aprimorando a precisão e a confiabilidade dos resultados.

Os resultados evidenciam que a incorporação da estrutura espacial nos modelos de análise é fundamental para aprimorar a precisão na avaliação de híbridos de milho. Ao considerar a variabilidade natural do ambiente experimental, o modelo com informações espaciais demonstrou maior capacidade para corrigir erros decorrentes de heterogeneidades no solo, garantindo estimativas mais robustas e confiáveis. Esses achados ressaltam a importância de integrar análises espaciais em experimentos agrônômicos, sobretudo em condições de alta adubação, onde a influência ambiental pode comprometer a eficiência dos tratamentos. Assim, a utilização de modelos espaciais não só eleva a qualidade da interpretação dos dados, mas também fundamenta decisões mais precisas e eficazes no manejo e na seleção dos híbridos, contribuindo para o avanço e a sustentabilidade da cultura do milho.

## REFRÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J. & FIORIN, J.E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. R. Bras. Ci. Solo, 20:151-157, 1996.
- ANJOS, Rafael Silva Ramos dos. Análise estatística espacial de experimentos de híbridos de milho em condições contrastantes de fósforo no solo. 2019. 131 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.
- ARIEF, V. N. et al. Utilization of Multiyear Plant Breeding Data to Better Predict Genotype Performance. Crop Science, v. 59, p. 480-490. 2019. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.03.0182>
- BERG, M.V.D. & KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solos na região do planalto médio, RS: I. Análise da variância por amostragem aninhada. R. Bras. Ci. Solo, 21:393-399, 1997.
- BERTOLANI, F.C. & VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. R. Bras. Ci. Solo, 25:987-995, 2001.
- BORGES, A.; GONZÁLEZ-REYMUÑEZ, A.; ERNST O.; CADENAZZI, M.; TERRA, J.; GUTIÉRREZ, L. Can Spatial Modeling Substitute for Experimental Design in Agricultural Experiments?. Crop Science, v. 59, n. 1, p. 44-53, 2019.
- BORGES, A. et al. Can Spatial Modeling Substitute for Experimental Design in Agricultural Experiments? Crop Science. v. 59, p. 44-53. 2019. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.03.0177>
- BURGUENÓ, J. Spatial Analysis of Field Experiments. In: GLAZ, B.; YEATER, K. M. Applied Statistics in Agricultural, Biological, and Environmental Sciences. Madison, WI: ASA, CSSA, and SSSA Books, 2018. p. 319-344. DOI: <https://doi.org/10.2134/appliedstatistics.2016.0011.c12>
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 11º décimo primeiro levantamento, agosto 2024.

COUTO, E.G.; KLAMT, E. & STEIN, A. Estimativa do teor de argila e do potássio trocável em solos esparsamente amostrados no sul do estado de Mato Grosso. R. Bras. Ci. Solo, 24:129-140, 2000.

CULLIS, B.R., SMITH, A.B. & COOMBES, N.E. (2006). On the design of early generation variety trials with correlated data. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 11(4), 381–393.

CRUZ, COSME DAMIÃO. *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. 3. ed. Viçosa: UFV, 2013. v. 1. 668 p.

COWLING, W. A. et al. Using the animal model to accelerate response to selection in a selfpollinating crop. G3: Genes, Genomes, Genetics, v. 5, p. 1419–1428. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1534/g3.115.018838>

DUARTE, J. B., VENCOVSKY, R. Spatial statistical analysis and selection of genotypes in plant breeding. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40, 107-114. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204x2005000200002>

GALVÃO, J.C.C., MIRANDA, G.V., TROGELLO, E., FRITSCHÉ-NETO, R., 2014. Sete décadas de evolução do sistema produtivo da cultura do milho. *Rev. Ceres* 61, 819–828. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201461000007>.

GILMOUR, A.R.; CULLIS, B.R.; VERBYLA, A.P. Accounting for natural and extraneous variation in the analysis of field experiments. *J Agric Biol Environ Stat*, v. 2, n. 3, p. 269-293, 1997.

GLEESON, A. C.; CULLIS, B. R. Residual Maximum Likelihood (REML) Estimation of a Neighbour Model for Field Experiments. *Biometrics*. v. 43, p. 277–287. 1987. DOI: <https://doi.org/10.2307/2531812>

GRONDONA, M.O.; CROSSA, J.; FOX, P.N.; PFEIFFER, W.H. Analysis of variety yield trials using two-dimensional separable ARIMA processes. *Biometrics*, p. 763-770, 1996.

LITTLE, T.M. & HILLS, F.J. *Agricultural experimentation*. New York, John Wiley & Sons, 1978. 350p.

LIU, S. M. et al. Benefit of spatial analysis for furrow irrigated cotton breeding trials. *Euphytica*. v. 201, p. 253–264. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-014-1205-2>

OLIVEIRA, J.J.; CHAVES, L.H.G.; QUEIROZ, J.E. & LUNA, J.G. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:783-789, 1999.

PIMENTEL-GOMES, F. P. **Curso de Estatística Experimental**. 11. ed. Piracicaba, SP: Nobel, 1985. 466 p.

R CORE TEAM (2023). **\_R: A Language and Environment for Statistical Computing\_**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

RAMALHO, M.A.P.; FERREIRA, D.F.; OLIVEIRA, A.C. *Experimentação em Genética e Melhoramento de Plantas*. 3. ed. Lavras, MG: Ed. UFLA, 2012a. 328p

RESENDE, M. D. V.; STURION, J. A. Análise estatística espacial de experimentos via modelos mistos individuais com erros modelados por processos ARIMA em duas dimensões. *Rev. Mat. Estat.*, v. 21, n. 1, p. 7-33, jan. 2003.

STEFANOVA, K. T.; SMITH, A. B.; CULLIS, B. R. Enhanced diagnostics for the spatial analysis of field trials. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, v. 14, n. 4, p. 392–410, dez. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1198/jabes.2009.07098>

SMITH, A.B., CULLIS, B.R. & THOMPSON, R. (2001). Analyzing variety by environment data using multiplicative mixed models and adjustments for spatial field trend. *Biometrics*, 57(4), 1138–1147.7

SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. *Statistical methods*. 7.ed. Ames, Iowa State University, 1974. 507p.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P. & VIEIRA, S.R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:77-86, 1998.