

LUCAS VASCONCELOS VIEIRA

**MODELOS PARAMÉTRICOS DE MATRIZES DE COVARIÂNCIA PARA MEDIDAS
REPETIDAS: UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO SOBRE O AJUSTE, O ERRO E O
PODER ESTATÍSTICO EM MODELOS LINEARES MISTOS**

Botucatu

2021

LUCAS VASCONCELOS VIEIRA

**MODELOS PARAMÉTRICOS DE MATRIZES DE COVARIÂNCIA PARA MEDIDAS
REPETIDAS: UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO SOBRE O AJUSTE, O ERRO E O
PODER ESTATÍSTICO EM MODELOS LINEARES MISTOS**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientadora: Profa. Dra. Maria Márcia
Pereira Sartori

Coorientador: Dr. Rodolfo Godoy

Botucatu

2021

V658m

Vieira, Lucas Vasconcelos

Modelos paramétricos de matrizes de covariância para medidas repetidas: um estudo de simulação sobre o ajuste, o erro e o poder estatístico em modelos lineares mistos / Lucas Vasconcelos Vieira. -- Botucatu, 2021
147 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu

Orientadora: Maria Márcia Pereira Sartori

Coorientador: Rodolfo Godoy

1. Modelos lineares. 2. Estatística. 3. Simulação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MODELOS PARAMÉTRICOS DE MATRIZES DE COVARIÂNCIA PARA MEDIDAS REPETIDAS: UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO SOBRE O AJUSTE, O ERRO E O PODER ESTATÍSTICO EM MODELOS LINEARES MISTOS

AUTOR: LUCAS VASCONCELOS VIEIRA

ORIENTADORA: MARIA MÁRCIA PEREIRA SARTORI

COORDENADOR: RODOLFO GODOY

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Pesquisadora Dr.^a MARIA MÁRCIA PEREIRA SARTORI (Participação Virtual)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. RENATO FERNANDES CANTÃO (Participação Virtual)
Física, Química e Matemática / Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. LUCIANO BARBOSA (Participação Virtual)
Bioestatística, Biologia Vegetal, Parasitologia e Zoologia / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP

Prof.^a Dr.^a ADELAIDE DE FÁTIMA BAPTISTA VALENTE FREITAS (Participação Virtual)
Matemática / Universidade de Aveiro

Prof. Dr. ANDERSON RODRIGO DA SILVA (Participação Virtual)
Agronomia / Instituto Federal Goiano

Botucatu, 27 de maio de 2021

Ao meu amado filho, Lucca,
e esposa, Mariana,
DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus queridos pais, Luíz e Fátima, e irmãs, Luise e Laise, pelo apoio incondicional.

A Prof^a. Dr^a. Maria Márcia Pereira Sartori pela oportunidade, apoio e orientação fundamentais em toda minha trajetória durante o Doutorado.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida.

A todos os pesquisadores passados e contemporâneos cujas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Em experimentos com medidas repetidas, a premissa de simetria composta (esfericidade), isto é, de correlação constante entre observações tomadas na mesma unidade, nem sempre é observada. Não obstante, os dados são frequentemente analisados como se correlações entre as medidas repetidas fossem constantes, como no caso da ANOVA para medidas repetidas, ou utilizando métodos que apenas consideram todas as correlações distintas, como no caso da ANOVA multivariada, podendo impactar na taxa de rejeição da hipótese nula, e consequentemente afetar a taxa de erro do tipo I e o poder estatístico. Nesse contexto, o presente estudo propôs investigar a aplicação de modelos lineares mistos com diferentes pressupostos sobre a matriz de covariância em conjuntos de dados provenientes de experimentos com medidas repetidas simulados. Foram avaliados 84 cenários que variaram quanto o padrão da matriz de covariância (14 estruturas), número de medidas repetidas (4 e 8) e de repetições (4, 8 e 12). Foram simulados 10,000 conjuntos de dados para cada cenário baseado em uma distribuição normal multivariada e que foram posteriormente analisados utilizando modelos lineares mistos aliados a máxima verossimilhança restrita. A taxa de erro do tipo I e o poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas foram estimados como a proporção de valores p menores ou iguais a 0.01 ou 0.05 de um total de 10,000 testes para cada cenário. Os modelos também foram avaliados quanto a habilidade de ajuste aos dados a partir dos critérios de seleção BIC. Assim, a frequência com a qual as estruturas de covariância foram escolhidas pelos critérios de seleção foi computada. Os resultados indicam que o pressuposto escolhido com maior frequência pelos critérios de informação resultou da estrutura de covariância especificada que correspondeu à estrutura de covariância empírica dos conjuntos de dados analisados, particularmente para aqueles conjuntos com tamanho amostral maiores. Os resultados também indicam que o uso de modelos de covariância que não reconheça correlações heterogêneas entre as medidas repetidas pode inflar o erro do tipo I a níveis muito liberais ou reduzi-lo a níveis muito conservadores, podendo afetar a conclusão dos experimentos agrícolas. Para um nível de significância e 0.05, o enviesamento da taxa de erro do tipo I foi superior a 2α , enquanto para um nível de significância de 1%, o enviesamento foi superior a 4α , quando o pressuposto sobre a estrutura de covariância dos dados não considerou a existência de correlações

heterogêneas, particularmente para aqueles conjuntos de dados com variâncias também heterogêneas, com um número maior de medidas repetidas e um menor tamanho amostral. A proporção de modelos de covariância escolhidos pelo critério de seleção foi superior para os modelos de covariância que correspondiam a estrutura empírica dos dados, particularmente para aquelas simulações com maior número de medidas repetidas e maior tamanho amostral.

Palavras-chave: teste F; modelos de covariância; robustez; dados correlacionados; erro do tipo I; poder estatístico; critérios de seleção; simulação.

ABSTRACT

The premise in experiments with repeated measures is that observations taken in the same experimental unit are correlated and that correlations decrease proportionally to the increase in the distance between measurements in time or space. Nevertheless, these experiments are often analyzed as if the correlations between the repeated measures were constant or using methods that only consider correlations different, which may impact on the rejection rate of the null hypothesis, and ultimately type I error rate and statistical power. In this context, the present study investigated the application of mixed linear models with different assumptions about the covariance matrix in data sets from simulated experiments with repeated measures. 84 scenarios that varied in terms of the covariance matrix pattern (14 structures), number of repeated measurements (4 and 8) and sample size (4, 8 and 12) were evaluated. 10,000 datasets were simulated for each scenario based on a multivariate normal distribution and were subsequently analyzed using mixed linear models. Type I error rate and statistical power for the hypothesis test of the interaction between treatments and repeated measures were estimated as the proportion of p values less than or equal to 0.01 or 0.05 out of a total of 10,000 tests for each scenario. The models were also evaluated for their ability to fit the data using Bayesian Information Criteria (BIC). Thus, the frequency with which the covariance structures were chosen by the selection criteria was computed. Results indicate that the assumption chosen most frequently by the information criteria resulted from the specified covariance structure that corresponded to the empirical covariance structure of the analyzed data sets, particularly for those with larger number of repeated measures and sample sizes. Results also indicate that the use of covariance models that do not recognize heterogeneous correlations between repeated measures can inflate type I error or reduce it to very conservative levels, which may affect the conclusion of agricultural experiments. For a 5% significance level, type I error bias was greater than 2α , while for 1% significance level, bias was over 4α . In addition, the statistical power was reduced when the assumption about the covariance matrix of the data sets did not correspond to the empirical covariance structure, particularly for those datasets with a smaller sample size.

Keywords: covariance models; F test; robustness; correlated data; type I error; statistical power; information criteria; simulation.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância
RANOVA	Análise de Variância para Medidas Repetidas
MANOVA	Análise de Variância Multivariada
MLM	Modelos Lineares Mistos
NMV	Normal Multivariada
I	Padrão Identidade
BAND (3)	Padrão em Bandas (3)
BANDH (3)	Padrão em Bandas (3) com Variâncias Heterogêneas
CV	Padrão Componentes de Variância
TOEP	Padrão Toeplitz
TOEPH	Padrão Toeplitz com Variâncias Heterogêneas
TOEP (2)	Padrão Toeplitz (2)
TOEPH (2)	Padrão Toeplitz (2) com Variâncias Heterogêneas
TOEP (3)	Padrão Toeplitz (3)
TOEPH (3)	Padrão Toeplitz com Variâncias Heterogêneas
UN	Padrão sem Estrutura
SC	Padrão de Simetria Composta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1	Experimentos envolvendo medidas repetidas.....	22
2.2	Análise de experimentos envolvendo medidas repetidas.....	23
2.3	Erro e poder estatístico.....	27
2.4	Modelos lineares mistos.....	29
2.4.1	Efeitos fixos e aleatórios.....	29
2.4.2	Modelos condicionais e marginais.....	31
2.4.3	Formulação geral dos modelos lineares mistos.....	32
2.4.4	Modelos lineares mistos para experimentos envolvendo medidas repetidas.....	33
2.4.5	Estimação e inferência sobre efeitos fixos e aleatórios.....	35
2.5	Estruturas de covariância.....	38
2.5.1	Padrões para intervalos de tempo iguais.....	41
2.5.2	Seleção de modelos de covariâncias.....	44
2.5.3	Qualidade dos estimadores em modelos mistos aplicados a experimentos envolvendo medidas repetidas.....	46
3	MATÉRIAS E MÉTODOS.....	49
3.1	Simulação dos cenários experimentais.....	49
3.2	Especificação dos efeitos dos fatores principais e da interação nas simulações.....	52
3.3	Determinação da taxa de erro do tipo I e poder dos testes de hipóteses.....	53

3.4	Seleção do modelo de covariância.....	54
3.5	Procedimento glimmix para experimentos envolvendo medidas repetidas.....	54
3.6	Algoritmo de simulação.....	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1	Seleção de estruturas de covariância.....	57
4.2	Estudo sobre erro do tipo i em modelos lineares mistos aplicados a experimentos envolvendo medidas repetidas.....	59
4.3	Estudo sobre poder estatístico em modelos lineares mistos aplicados a experimentos envolvendo medidas repetidas.....	61
5	CONCLUSÕES.....	65
	REFERÊNCIAS.....	67
	APÊNDICE A – Seleção de modelos.....	70
	APÊNDICE B – Erro do tipo I ($\alpha = 0,01$)	76
	APÊNDICE C – Erro do tipo I ($\alpha = 0,05$)	90
	APÊNDICE D – Poder estatístico ($\alpha = 0,01$)	104
	APÊNDICE E – Poder estatístico ($\alpha = 0,05$)	118
	APÊNDICE F – Códigos em python e SAS utilizados no experimento...	132

1 INTRODUÇÃO

Observações correlacionadas são comuns em experimentos que envolvem componentes biológicos e físicos como em ensaios agrícolas. Estruturas correlacionadas podem frequentemente surgir em estudos nos quais observações estão estruturadas em grupos, nos quais observações pertencentes a um mesmo grupo tendem a apresentar maior grau de correlação do que aquelas de grupos distintos. Por exemplo, medidas repetidas na mesma unidade experimental induzindo correlações temporais ou espaciais, e efeitos aleatórios comuns a várias unidades experimentais. No caso de experimentos com medidas repetidas, que são conduzidos para a avaliação de mudanças no tempo (dias, meses, anos) ou no espaço (amostras de solos em diferentes profundidades) e o efeito de tratamentos sobre essas mudanças, as unidades experimentais precisam ser observadas em dois ou mais intervalos de tempos ou espaços durante a condução do experimento. Logo, observações na mesma unidade experimental (parcela) tendem a estar não somente correlacionadas de forma proporcional, mas também as observações mais próximas no tempo ou espaço tendem a ser mais correlacionadas que aquelas mais distantes (CONDORELLI et al., 2018; GBUR et al., 2012; LI et al., 2016; LIU et al., 2020; YANG; JUSKIW, 2011).

A análise de variância univariada para medidas repetidas (RANOVA) baseada em modelos lineares tradicionais aliados a quadrados mínimos pode restringir a análise de dados de experimentos com medidas repetidas. A estrutura dos erros pode ser mais complexa que aquelas impostas pelo pressuposto de esfericidade. O pressuposto de esfericidade é avaliado sob a forma de simetria composta, uma condição na qual todas as variâncias das medidas repetidas são iguais e todos os pares de correlações entre elas também são iguais. Simetria composta é uma condição suficiente, mas não necessária para a validação da esfericidade e, portanto, nem sempre satisfeita. Apesar de não ser necessária, a falta de simetria composta indica que esfericidade é improvável. Apesar de relativamente robusta contra violação da normalidade, particularmente quando tamanho amostral é grande o suficiente como propõe o teorema do limite central, a aplicação da abordagem RANOVA em conjuntos de dados cujas observações foram coletadas com algum tipo de estrutura de dependência mais complexa que aquele de variâncias homogêneas e correlações homogêneas pode levar a perda da robustez desses procedimentos devido a

estimativas enviesadas dos erros padrão (BAKDASH & MARUSICH, 2017; HAVERKAMP e BEAUDUCEL., 2017).

Estimadores robustos são importantes para garantir que as estimativas provenientes de experimentos com medidas repetidas sejam razoavelmente eficientes e assintoticamente não enviesadas (enviesamento tendendo a zero à medida que o tamanho amostral se aproxima de infinito). O conceito de eficiência refere-se à variabilidade amostral de um estimador. A variância de um estimador mede o grau de espalhamento das estimativas e a sua informação é inversamente proporcional a precisão, pois quanto menor for a variância das estimativas, maior será a precisão da informação. O grau de deslocamento dessa informação é dada pelo enviesamento, de forma que quanto menor for o valor do viés, maior será a acurácia da informação. Um estimador será eficiente se a variância for o menor possível.

Apesar da abordagem RANOVA reconhecer a existência de correlações entre medidas repetidas, ignora a existência de heterogeneidade nas correlações através da imposição de uma estrutura de simetria composta, na qual pares de observações possuem a mesma correlação independente de quão distantes estão no tempo ou espaço. Assim, aumenta o risco de se obter desvios padrões incorretos para os testes de hipótese e para as comparações entre médias dos diferentes tempos. Quando o pressuposto de esfericidade é violado, os cálculos dos testes F podem ficar distorcidos, podendo resultar em testes inflacionados, e uma maior probabilidade do pesquisador concluir que um resultado tem significância estatística, quando na realidade ele aconteceu por acaso. A consequência dessa violação é o enviesamento positivo ou testes mais liberais (a probabilidade de um falso positivo supera aquele estabelecido pelo pesquisador através do nível de significância α). Embora ajustes possam ser feitos nos testes a fim de contabilizar pelas correlações dependentes das medidas repetidas, tais correções são frequentemente inadequadas (LIU et al., 2020; YANG e JUSKIW, 2011).

Outro método que tem sido bastante utilizado quando os pressupostos da RANOVA não se sustentam é a análise de variância multivariada (MANOVA) (VASEY E THAYER, 1987). Apesar de permitir correlações heterogêneas, o pressuposto sobre a estrutura dos erros pode acarretar poder estatístico reduzido, pois a única estrutura

de covariância assumida é aquela na qual todas as correlações são distintas, acarretando número maior de parâmetros estimados (OBERFELD; FRANKE, 2013).

Pressupostos sobre a estrutura de variância e covariância dos erros em experimentos com medidas repetidas que sejam muito simples, como na abordagem RANOVA, ou muito complexos, como na abordagem MANOVA podem afetar a taxa do erro do tipo I e o poder estatístico. Além disso, devido ao método de estimação envolvido (quadrados mínimos ordinários) para estimação dos efeitos fixos, a habilidade de lidar com dados ausentes em ambas as abordagens é bastante limitada. Caso uma medida repetida esteja faltando para uma unidade experimental, as demais observações para aquela unidade experimental precisam ser também excluídas, acarretando a perda de mais informações do conjunto de dados. Por isso, as abordagens RANOVA e MANOVA não são recomendadas para conjuntos de dados desbalanceados, que são frequentes na experimentação agrícola.

Apesar da importância histórica para o desenvolvimento da análise de experimentos com medidas repetidas, os métodos anteriores apresentam desvantagens que tem impulsionado o desenvolvimento de outros métodos mais adequados para situações nas quais dados são coletados com alguma estrutura de dependência. Assim, as abordagens citadas anteriormente para experimentos com medidas repetidas têm sido gradativamente substituídas por outra capazes de incorporar diferentes estruturas de covariâncias entre as observações diretamente no modelo. Avanço nos procedimentos estatísticos nas últimas décadas, particularmente na área computacional, tem sido de grande interesse para a pesquisa agrícola, pois tem fornecido abordagens mais adequadas para experimentos com medidas repetidas, com efeitos aleatórios comuns a várias unidades experimentais como em delineamentos em blocos, com parcelas subdivididas, dados complexos de bioinformática como estudos genéticos e moleculares, além de outras situações com fontes múltiplas de variação, acarretando no agrupamento de observações com algum grau de correlação (ZHANG et al., 2019). Atualmente, a recomendação tem sido pela utilização de modelos lineares mistos aliados a quadrados mínimos generalizados e estimadores de máxima verossimilhança restrita para análise de experimentos com medidas repetidas, permitindo maior flexibilidade para a modelagem de diferentes estruturas de covariâncias (LI, 2017; STUDNICKI, 2015; SANTOS, 2021).

Modelos mistos estendem modelos lineares tradicionais aliados a quadrados mínimos ordinários através de pressupostos mais flexíveis e complexos sobre os erros, permitindo adicionar outros efeitos aleatórios, considerando adequadamente as correlações dependentes do tempo para as medidas repetidas nas unidades experimentais. A abordagem MLM permitem que o erro seja particionado entre observações e componentes de grupo, que assumem a forma de termos residuais adicionais, cada um com sua própria variância a ser estimada. Além disso, devido aos processos de estimação por meio da máxima verossimilhança, modelos mistos lidam mais eficientemente com dados desbalanceados. Ainda, um importante atributo dos modelos lineares mistos é a existência de dois tamanhos amostrais: o número de grupos (N) e o número de observações por grupo (n). No caso de experimentos envolvendo medidas repetidas, o número de medidas no tempo ou espaço e o número de unidades experimentais tomadas em cada medida repetida. Pesquisas anteriores demonstram que o número de grupos é mais importante que o número de observações por grupo para a manutenção da consistência dos estimadores. Por outro lado, a determinação de um n adequado é fundamental para a obtenção do poder estatístico desejado. Muitos estudos carecem de poder suficiente para fazer decisões corretas ou detectar um efeito quando ele existir (GEZAN, e CARVALHO, 2018).

Apesar da intensa pesquisa e do aumento de sua popularidade devido a disponibilidade em muitos programas estatísticos livres como R (R CORE TEAM, 2015) e Python (ROSSUM e DRAKE, 2009) e empresariais como SAS (SAS INSTITUTE INC., 2015), a aplicação de modelos lineares mistos nas ciências agrárias ainda é bastante tímida, particularmente para pesquisadores não estatísticos. A flexibilidade com a qual modelos lineares mistos destacam-se diante dos modelos lineares tradicionais é a mesma que os tornam mais complexos, e consequentemente menos utilizados. Além disso, a terminologia relacionada é bastante heterogênea e confusa. Um outro problema que dificulta a utilização de modelos mistos é a não existência de método definitivo para determinar a melhor estrutura de variância-covariância (DEMIDENKO, 2013).

Gbur et al. (2012) ainda argumenta que também é preciso levar em consideração a parcimônia e o significado ao selecionar estruturas de covariância. A decisão é frequentemente baseada na comparação entre modelos com diferentes

estruturas de covariância utilizando teste de razão de verossimilhança ou critérios de informação como AIC e BIC. Trabalhos anteriores sugerem que um controle ideal da taxa de erro do tipo I enquanto se mantém um nível satisfatório de poder estatístico para detectar possíveis diferenças reais nos experimentos resultaria da estrutura de covariância especificada que corresponde à estrutura de covariância empírica do conjunto de dados. Contudo, outros trabalhos sugerem esse controle pode não necessariamente resultar da combinação entre o modelo de covariância especificado e a matriz de covariância empírica dos dados, exigindo investigação para diferentes modelos de covariância.

Uma forma de avaliar o efeito de diferentes pressupostos sobre a matriz de covariância em experimentos com medidas repetidas é através de simulações de conjunto de dados com certas características que permitem realçar os efeitos da aplicação de certos modelos mistos à cenários específicos de covariância. Por exemplo, pesquisas revelam que a eficácia de modelos lineares mistos em capturar a estrutura de variância e covariância dependerá das características dos dados, procedimentos de estimação, padrões de variância e covariância. Por isso, estudos de simulação são necessários para avaliar a qualidade dos estimadores provenientes de modelos lineares mistos considerando diferentes cenários experimentais a fim de possibilitar que pesquisadores das áreas agrícolas e biológicas obtenham resultados mais precisos e acurados dos experimentos (GUEORGUEVA e KRYSTAL, 2004).

Nesse contexto, foi hipotetizado que a utilização de modelos lineares mistos com pressupostos inadequados sobre a estrutura de covariância em experimentos com medidas repetidas pode afetar o poder estatístico do teste dos testes de hipóteses e alterar a taxa de rejeição da hipótese nula a níveis ou muito conservadores ou muito liberais, afetando a conclusão dos experimentos. Assim, o presente estudo teve como objetivo geral a aplicação, avaliação, e seleção de modelos lineares mistos com diferentes pressupostos sobre a matriz de covariância entre as medidas repetidas em conjuntos de dados provenientes de experimentos simulados cujas matrizes de covariâncias foram ajustadas para diferentes padrões. Foi hipotetizado que o modelo de covariância escolhido a partir dos critérios de informação e o controle do erro do tipo I ideal corresponde a estrutura de covariância empírica dos dados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Experimentos envolvendo medidas repetidas

Experimentos com medidas repetidas são definidos como aqueles nos quais as unidades experimentais são observadas em dois ou mais tempos ou espaços previamente planejados durante o decorrer do experimento. A característica principal é o objetivo de mensurar mudanças na variável resposta sobre um intervalo de tempo ou espaço de interesse e o efeito de tratamentos sobre essas mudanças (GBUR et al. 2012). O interesse do pesquisador reside na interação entre tratamentos e medidas repetidas a fim de avaliar se as mudanças no tempo ou espaço são as mesmas para todos os tratamentos. O desenvolvimento inicial dessa metodologia foi em psicologia, e por isso, algumas das terminologias utilizadas provém dessa disciplina, como o termo referente a unidades experimentais, denominado de sujeito ou indivíduo (BAKDASH, 2017).

Experimentos com medidas repetidas seguem a seguinte estrutura geral:

1. Existem dois tratamentos ou mais ($T > 2$) e as unidades experimentais são assinaladas aleatoriamente para cada tratamento seguindo qualquer delineamento (completamente aleatorizado, em blocos completos ou incompletos etc.)
2. O número de unidades experimentais por tratamento J_i , $i = 1, 2, \dots, T$, não precisa ser igual, e cada unidade experimental é observada K vezes ao longo do tempo ou espaço.
3. O intervalo entre as medidas repetidas não precisa ser igualmente espaçado, mas geralmente são regulares e refletem a biologia do estudo em consideração, por exemplo, estágios de crescimento.

Segundo Gbur et al (2012), existem duas questões principais na análise de experimentos com medidas repetidas: a construção de um modelo adequado para a média e a seleção de um modelo adequado, parcimonioso, para a estrutura de covariância envolvendo as medidas repetidas. O modelo da média é determinado pelos fatores do experimento, ignorando o aspecto das medições repetidas. O modelo para a parte do experimento que não inclui medidas repetidas é chamado de modelo

entre sujeitos e a parte do modelo que envolve as medições repetidas é chamada de modelo intrassujeito.

Para o modelo da estrutura de covariância, uma premissa importante da modelagem de experimentos com medidas repetidas é que observações tomadas na mesma unidade experimental são mais correlacionadas, e observações tomadas mais próximas no tempo ou espaços são mais correlacionais que aquelas mais distantes. Esse tipo de correlação é conhecido como correlação serial. A modelagem de experimentos com medidas repetidas exige métodos de análise robustos o suficiente para levar em consideração as correlações entre as medidas repetidas para uma mesma unidade experimental, a fim de evitar conclusões incorretas dos experimentos (SOKAL e ROHLF, 1995).

2.2 Análise de experimentos envolvendo medidas repetidas

Os primeiros métodos para experimentos com medidas repetidas assemelham-se aqueles desenvolvidos para experimentos em parcelas subdivididas (*split-plots*), baseado no modelo de regressão linear tradicional, aliados a estimadores de quadrados mínimos (MCCULLAGH e NELDER, 1989). Neles, a porção do tratamento é considerada a parcela principal e a porção das medidas repetidas (tempo ou espaço) o fator das parcelas subdivididas. O diferencial é quanto aos pressupostos sobre os erros das parcelas subdivididas (medidas repetidas) que, para os experimentos em parcela subdivididas, são independentes e normalmente distribuídos, enquanto para modelos com medidas repetidas, são de normalidade, mas não necessariamente de independência. Na abordagem para medidas repetidas, o pressuposto é de esfericidade, que é avaliado através do padrão de simetria composta, que assume correlações homogêneas entre os diferentes pontos de tempo ou espaço, independente da distância entre eles (PATTERSON e THOMPSON, 1971).

Para exemplificar o padrão de simetria composta, pressuposto exigido pela abordagem RANOVA, considere o seguinte modelo para parcelas subdivididas para dois fatores A e B, sendo B o fator de medidas repetidas:

$$y_{ijk} = \mu + A_i + \eta_k + B_k + AB_{ik} + \epsilon_{ijk}$$

em que y_{ijk} é o efeito da j -ésima unidade experimental no k -ésimo nível do tratamento B pertencente ao i -ésimo nível do tratamento A. Nesse modelo, μ é a média geral, A_i é o efeito do i -ésimo tratamento, η_{ij} é o erro atribuído a parcela principal, B_k é o efeito do k -ésimo tempo e ϵ_{ijk} é o erro atribuído a parcela subdividida tempo.

Nesse modelo, tem-se que:

$$\sum_i A_i = 0$$

$$\sum_k B_k = 0$$

$$\sum_i AB_{ik} = 0 \quad \forall k$$

$$\sum_k AB_{ik} = 0 \quad \forall i$$

$$\eta_{ij} \sim^{idd} N(0, \sigma_\eta^2)$$

$$\epsilon_{ij} \sim^{idd} N(0, \sigma_\epsilon^2)$$

$$\text{cov}(\eta_{ij}, \epsilon_{ijk}) = 0$$

Como η_{ij} e ϵ_{ijk} são independentes e normalmente distribuídos, então a soma $\epsilon_{ijk}^* = \eta_{ij} + \epsilon_{ijk}$ também é normalmente distribuída. Assim, o modelo marginal pode ser expresso por:

$$y_{ijk} = \mu + A_i + B_k + AB_{ik} + \epsilon_{ijk}^*$$

$$\text{cov}(\epsilon_{ijk}, \epsilon_{i'j'k'}) = \sigma_\eta^2 + \sigma_\epsilon^2 \quad \forall i = i', j = j', k = k'$$

$$\text{cov}(\epsilon_{ijk}, \epsilon_{i'j'k'}) = \sigma_\eta^2 \quad \forall i = i', j = j', k \neq k'$$

$$\text{cov}(\epsilon_{ijk}, \epsilon_{i'j'k'}) = 0 \quad \forall i \neq i', j \neq j', k = k'$$

Essa abordagem implica que pares de observações pertencente ao mesmo tratamento e a mesma unidade experimental (parcela), mas tempos diferentes, possuem covariância σ_η^2 , enquanto aqueles pares de observações provenientes de

tratamentos diferentes e unidade experimental diferentes não são correlacionadas (MARCIN et al., 2015).

Um dos grandes avanços da RANOVA sobre a ANOVA tradicional, é a habilidade de particionar a variabilidade devido a diferenças entre as unidades experimentais ou sujeitos. Por exemplo, considere a estrutura geral dos testes F:

$$F = \frac{QM_{\text{TRATAMENTO}}}{QM_{\text{ERRO}}}$$

$$F = \frac{SQ_{\text{TRATAMENTO}}/GL_{\text{TRATAMENTO}}}{SQ_{\text{ERRO}}/GL_{\text{ERRO}}}$$

Na ANOVA tradicional, existe um elemento de variância devido as unidades experimentais que é combinada com o tratamento e o erro:

$$SQ_{\text{TOTAL}} = SQ_{\text{TRATAMENTOS}} + SQ_{\text{ERRO}}$$

$$gl_{\text{TOTAL}} = n - 1$$

Na ANOVA para medidas repetidas, é possível separar a variabilidade do sujeito dos termos do tratamento e do erro. Nesse caso, a variabilidade total pode ser particionada em variabilidade entre tratamentos, excluindo diferenças individuais, e variabilidade dentro dos tratamentos. A variabilidade dentro dos tratamentos pode ser ainda dividida em variabilidade entre sujeitos (diferenças individuais) e erro (excluindo as diferenças individuais):

$$SQ_{\text{TOTAL}} = SQ_{\text{TRATAMENTOS}} + SQ_{\text{SUJEITOS}} + SQ_{\text{ERRO}}$$

$$gl_{\text{TOTAL}} = gl_{\text{DENTRO DO SUJEITO}} + gl_{\text{ENTRE SUJEITOS}} + gl_{\text{ERRO}}$$

$$gl_{\text{TOTAL}} = (k - 1) + (n - 1) + [(n - k) \times (n - 1)]$$

Essa abordagem fornece maior poder estatístico comparado com a ANOVA para observações independentes, porque é capaz de explicar melhor a origem da variância. Esta vantagem é alcançada pela redução no quadrado médio do erro (o denominador da estatística F) que vem do particionamento da variabilidade devido às diferenças entre os sujeitos no caso da ANOVA independente. Contudo, o particionamento reduz os graus de liberdade da estatística F, e, portanto, a

variabilidade entre os sujeitos deve ser significativa o suficiente para compensar a perda em graus de liberdade. Se a variabilidade entre os sujeitos for pequena, esse processo pode, na verdade, reduzir o valor F .

Para que os resultados da RANOVA sejam acurados, alguns pressupostos precisam ser satisfeitos como normalidade multivariada, homocedasticidade e esfericidade. A violação desses pressupostos pode acarretar aumento da taxa de erro do tipo I. Observações correlacionadas como no caso de experimentos com medidas repetidas frequentemente causam uma superestimação dos testes estatísticos, que frequentemente são tratadas com níveis de significância mais conservadores. Essa correção é feita ajustando os graus de liberdade para baixo para determinar o valor F crítico. Duas correções são comumente usadas: a correção Greenhouse – Geisser e a correção Huynh – Feldt. A primeira é mais conservadora, mas aborda um problema do aumento da variabilidade ao longo do tempo ou espaço. A segunda é menos conservadora, mas não aborda questões de variabilidade crescente. Pesquisas mostram que Huynh – Feldt inferior seja usado quando a violações menores da esfericidade, enquanto Greenhouse-Geisser seja usado quando com violações maiores. Segundo Gbur et al (2012), essa abordagem nem sempre é a melhor análise estatística para experimentos com medidas repetidas, pois é vulnerável a efeitos de dados desbalanceados, imputação, pontos de tempo desiguais entre medidas repetidas e violações do pressuposto de esfericidade.

A abordagem RANOVA é robusta contra violação da normalidade multivariada no sentido que a taxa real de erro do tipo I para os testes F é próxima da taxa nominal (nível de significância) quando os dados são não normais. O pressuposto de normalidade precisa ser drasticamente violado com um tamanho amostral menor para que se tenha um efeito pronunciado nos testes estatísticos. Nesses casos, são sugeridas alternativas como testes não paramétricos ou transformações são recomendados.

Por outro lado, violação do pressuposto de esfericidade tende a superestimar o nível de significância, potencialmente aumentando a taxa de erro do tipo I. Nesses casos, uma alternativa é o uso da ANOVA multivariada (MANOVA) que fornece maior poder estatístico. Apesar de permitir correlações heterogêneas, o pressuposto sobre a estrutura dos erros acarreta estimadores ineficientes e em poder estatístico

reduzido, pois a única estrutura de covariância assumida é aquela com todas as correlações distintas, acarretando é um número maior de parâmetros estimados. No entanto, se o pressuposto de esfericidade não é violado, a abordagem RANOVA possui maior poder estatístico pois tem maior grau de liberdade comparado com a abordagem MANOVA.

O conceito de eficiência refere-se à variabilidade amostral relativa de um estimador. Um estimador será eficiente se o erro quadrático médio for o menor possível. Se dois estimadores concorrentes forem imparciais, aquele com a menor variância (para um determinado tamanho de amostra) é considerado relativamente mais eficiente. Quanto menor a variância do estimador não viesado, mais concentrada é a distribuição do estimador em torno do parâmetro sendo estimado e, portanto, melhor é esse estimador (DIXON, 2008).

Nesse estudo, o interesse reside na eficiência dos testes de hipótese dos efeitos fixos em experimentos envolvendo medidas repetidas, e como a eficiência dos estimadores podem se afetadas pela existência de correlação no dados, particularmente em experimentos com medidas repetidas. Quando existe fuga da esfericidade, estimadores de mínimos quadrados ordinários, embora continuem lineares, não viesados, consistentes e assintoticamente normais, não são mais eficientes. Assim, a quantidade de confiança que o pesquisador terá nas estimativas dos coeficientes dos efeitos será incorretamente estimada devido a introdução de viés no modelo. Erros padrão enviesados levam a inferência tendenciosa.

2.3 Erro e poder estatístico

Na prática, pesquisadores estão interessados na existência ou não diferenças entre tratamentos. O teste trata de escolher entre duas proposições concorrentes chamadas de hipótese nula (H_0) e hipótese alternativa (H_1). Existem duas situações em que a decisão sobre a diferença entre tratamentos está errada. A hipótese nula pode ser verdadeira, enquanto rejeita-se H_0 . Por outro lado, a hipótese alternativa H_1 pode ser verdadeira, ao passo que não rejeita-se H_0 . Logo, dois tipos de erro são distinguidos: erro do tipo I e erro do tipo II, respectivamente (CASELLA e BERGER, 2002).

O primeiro tipo de erro, denominado de erro do tipo I ou falso positivo, é definido como a rejeição da hipótese nula (H_0) em favor da hipótese alternativa (H_1) quando, na realidade, H_0 é verdadeira. Assim, comete-se tal erro quando se conclui que um resultado tem significância estatística quando na realidade ele aconteceu por acaso. A probabilidade de um teste estatístico cometer um erro do tipo I é denotada por α . Caso o pesquisador rejeite a hipótese nula quando o valor p é menor que ou igual a α (nível de significância), então α é a taxa nominal do erro do tipo I. Algumas abordagens para análise de experimentos com medidas repetidas são mais robustas que outras no sentido que controlam a taxa de erro do tipo I. Por outro lado, o segundo tipo de erro, denominado de erro tipo II ou falso negativo, é definido como quando o teste deixa de rejeitar H_0 em favor de H_1 , quando H_0 é na realidade falsa. A probabilidade de se cometer tal erro é denotada por β , sendo inversamente proporcional ao aumento do número de desvios padrão da H_1 em relação H_0 , e ao valor escolhido pelo pesquisador para α (DIXON, 2008).

A mesma ideia pode ser expressa em termos de taxa de resultados corretos e, portanto, usada para minimizar as taxas de erro e melhorar a qualidade do teste de hipótese. Assim, um conceito bastante relacionado com erro do tipo II é o conceito de poder estatístico, que se refere a probabilidade de rejeitar a hipótese nula quando ela é de fato falsa ($1 - \beta$) dado um tamanho de efeito, nível de significância e tamanho de amostra especificados. Poder quantifica a probabilidade de se fazer a decisão correta sobre a rejeição da hipótese e é uma parte crucial no processo de planejamento e delineamento de experimentos agrícolas. Muitos estudos carecem de poder suficiente para fazer decisões corretas ou detectar um efeito quando ele existir. A escolha de um valor pequeno para α resulta em um aumento de β , e consequentemente uma redução no poder do teste. Por isso, para um tamanho amostral n fixo, o pesquisador não pode fazer com que α e β sejam pequenos simultaneamente. Quando o poder estatístico de um teste é baixo, há uma alta probabilidade de um erro do tipo II, ou a conclusão de que não há efeito quando existe um efeito verdadeiro na população de interesse.

Um teste de hipóteses perfeito teria zero falsos positivos e zero falsos negativos. No entanto, os métodos estatísticos são probabilísticos e não se pode saber com certeza se as conclusões estatísticas estão corretas. Sempre que houver

incerteza, existe a possibilidade de se cometer um erro. Considerando esta natureza da ciência estatística, todos os testes de hipóteses estatísticas têm uma probabilidade de cometer erros do tipo I e do tipo II. Além disso, a seleção de um tamanho amostral apropriado é fundamental para que o estudo tenha poder estatístico suficiente para detectar diferença. Um estudo com um tamanho amostral excessivo leva a gasto desnecessário de recursos.

2.4 Modelos lineares mistos

As desvantagens quanto a qualidade dos estimadores nas abordagens de ANOVA univariada e multivariada para medidas repetidas tem impulsionado o desenvolvimento de outros métodos mais adequados, como o de modelos lineares mistos, que permitem acomodar diferentes estruturas de variância e covariância no modelo, e contabilizar pelas correlações entre as medidas repetidas de forma mais parcimoniosa. Modelos lineares mistos estendem modelos lineares tradicionais aliados a quadrados mínimos através de pressupostos mais flexíveis e complexos sobre os erros e sobre outros efeitos aleatórios. Essa abordagem constitui uma classe flexível de modelos que permitem a modelagem de dados que apresentam algum tipo de estrutura de dependência entre as observações (GEZAN, S. A., e CARVALHO, 2018).

2.4.1 Efeitos fixos e aleatórios

Os critérios para o enquadramento dos efeitos como fixos ou aleatórios em cada realidade experimental vai depender de como os níveis dos fatores foram selecionados e dos objetivos do experimento. Efeitos fixos são efeitos atribuídos a um conjunto finito de níveis do fator ou tratamento que representa constantes a serem estimadas, sendo cada nível deliberadamente escolhido para o experimento. Por exemplo, em um experimento de campo conduzido em vários locais, caso o efeito de local representasse diferentes regiões de crescimento da cultura e seja de interesse determinar qual dentre várias cultivares é a mais produtiva para cada região, então o efeito de região e cultivar poderiam ser considerados como fixos. Nesse caso, a inferência teria foco na diferença entre as médias dos genótipos para cada região, e

seria restrita apenas as regiões e cultivares incluídas no experimento, não sendo possível ser estendida para outras regiões ou cultivares. Tanto para a análise de regressão como para a análise de covariância, as definições anteriores se aplicam uma vez que os intervalos dos valores observados definem a região sobre a qual pode-se inferir. Portanto, efeitos fixos determinam um modelo para a estimação de constantes desconhecidas. No caso do exemplo anterior, as constantes desconhecidas seriam as médias das cultivares em cada região (LI, 2017; STUDNICKI, 2015; SANTOS, 2021).

Por outro lado, efeitos aleatórios são efeitos atribuídos a um conjunto de níveis de uma população de níveis do qual apenas uma amostra aleatória ocorre no experimento. Assim, efeitos aleatórios representam realizações de uma variável aleatória com uma distribuição de probabilidade associada. Considerando o exemplo anterior, caso o interesse fosse na variabilidade da produtividade de grãos entre as diferentes regiões, o efeito de genótipo continuaria sendo considerado fixo enquanto o efeito de região passaria a ser aleatório. Para isso, um número representativo de regiões deveria ser incluído no experimento para ampliar as condições ambientais sob a qual os genótipos de milho estariam sendo cultivados. Neste caso, inferência sobre efeito aleatório de regiões teria foco na variabilidade entre as regiões de cultivo, e não na diferença entre médias. Isto permite ao pesquisador entender a inferência para uma população maior de locais, para além daqueles incluídos no experimento, no caso toda a região que os locais selecionados representam. (CONDORELLI et al., 2018).

Uma consequência das definições anteriores é que efeitos aleatórios também possuem uma distribuição de probabilidade associada, e em geral, considera-se que tal distribuição possui média zero e variância desconhecida. Uma aplicação prática dessas definições é no caso de estudos genéticos. Em fases iniciais de programas de melhoramento genético, quando existem muitos cruzamentos e muitas linhagens são cultivadas, é racional assumir que os efeitos genéticos sejam aleatórios. Porém, em fases finais, o debate acerca da suposição mais adequada sobre os efeitos de genótipos ainda é frequente na literatura. Os efeitos de genótipos geralmente são considerados como fixo em fases finais, embora alguns autores argumentem que seja mais coerente considerar os efeitos como aleatórios. Para Smith et al. (2005), mesmo no caso de análises ortogonais, nos quais o ranqueamento de cultivares podem ser

os mesmos sejam os efeitos dos genótipos fixos ou aleatórios, é recomendado considerar o efeito de genótipo como aleatório, devido ao fato de permitirem análises mais realistas entre os vários estágios de seleção, fornecendo estimativas mais reais dos efeitos.

Para experimentos com medidas repetidas, o efeito das unidades experimentais dentro do efeito de tratamentos é considerado aleatório, já que é de interesse do pesquisador modelar a covariância entre as medidas repetidas de unidade experimental dentro dos tratamentos. Assim existem duas fontes de variação, entre e dentro das unidades experimentais (sujeito) (GBUR et al., 2012).

2.4.2 Modelos condicionais e marginais

Uma distinção que surge em modelos mistos que não ocorre nos modelos de efeitos fixos diz respeito à modelagem condicional e marginal. Modelos nos quais os efeitos aleatórios estão explícitos são chamados de modelos condicionais. O nome deriva do fato de que a distribuição das observações é especificada condicionalmente nos efeitos aleatórios (LITTEL, 1996). Logo, para o modelo condicional tem-se:

$$Y | v \sim \text{NMV} (E[Y | v], \mathbf{R})$$

$$v \sim \text{NMV} (0, \mathbf{G})$$

$$E[Y | v] = \mathbf{X}\beta + \mathbf{Z}v$$

Por outro lado, modelos marginais são uma maneira alternativa de especificar modelos mistos. Como o próprio nome indica, eles são especificados em termos da distribuição marginal das observações:

$$Y \sim \text{NMV} (E[Y], \mathbf{V})$$

$$E[Y] = \mathbf{X}\beta$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{ZGZ}' + \mathbf{R}$$

Nesse caso, o preditor linear do modelo marginal contém apenas os efeitos fixos. Apesar dos efeitos aleatórios não serem modelados explicitamente, os impactos na variabilidade estão incorporados na estrutura de covariância do modelo $\mathbf{V}$. Assim,

o modelo marginal exclui os efeitos aleatórios do preditor linear, mas inclui a informação sobre sua variância na estrutura de variância-covariância da resposta.

Modelos lineares mistos podem ser formulados como um modelo condicional ou marginal. Apesar de ser frequentemente apresentado em sua forma condicional, o modelo marginal pode ser bastante mais útil em algumas situações, como experimentos com medidas repetidas. Ainda, quando todas as distribuições de probabilidade são normais, o modelo marginal e condicional resulta em estimadores idênticos de β e a mesma inferência para os efeitos fixos.

Para modelo mais simples, apenas com efeitos aleatórios e sem preditores de efeitos fixos, o objetivo é a estimação dos componentes de variância para determinar o coeficiente de correlação intragrupo, permitindo uma avaliação inicial da relevância dos grupos como fontes de variação (STROUP, 2013). Esse pode ser estendido para incluir coeficientes de regressão aleatórios. Para uma variável resposta Y com distribuição normal, considere que $x_1, \dots, x_p$ sejam um conjunto p de variáveis explicativas que descreve os efeitos fixos, que $u_1, \dots, u_q$ sejam efeitos aleatórios, e que n seja o número de observações. Em um modelo misto condicional, a média condicional para a j -ésima observação ($j = 1, \dots, n$) dado os efeitos aleatórios é expresso por:

$$E[Y_j | v_1, \dots, v_q] = \beta_{0k} + \sum_{i=1}^p \beta_i x_{ij} + \sum_{k=1}^q z_{kj} v_k$$

onde β_i é o i -ésimo coeficiente de efeito fixo a ser estimado, x_{ij} é a i -ésima variável explicativa de efeito fixo para a j -ésima observação, e z_{kj} é a variável indicadora binária para o k -ésimo efeito aleatório a ser estimado, v_k , na j -ésima observação. Tais modelos diferem da análise de covariância (ANCOVA), na qual os efeitos de v_k são fixos.

2.4.3 Formulação geral dos modelos lineares mistos

A formulação geral dos modelos lineares mistos em notação matricial é dada por:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{Z}\mathbf{v} + \boldsymbol{\epsilon}$$

Em que $\mathbf{y}$ é vetor de respostas, $\mathbf{X}$ é a matriz de delineamento dos efeitos fixos, $\boldsymbol{\beta}$ é o vetor desconhecido de efeitos fixos a ser estimado, $\mathbf{Z}$ é a matriz de delineamento dos efeitos aleatórios, $\mathbf{v}$ é o vetor desconhecido de efeitos aleatórios, e $\boldsymbol{\epsilon}$ o vetor de erros aleatórios.

A expectativa de $\mathbf{y}$ é expressa por:

$$E(\mathbf{y}) = E(\mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{Z}\mathbf{v} + \boldsymbol{\epsilon}) = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}$$

$$\mathbf{y} \sim N(\mathbf{X}\boldsymbol{\beta}, \mathbf{Z}\mathbf{G}\mathbf{Z}' + \mathbf{R})$$

É assumido que os efeitos aleatórios $\mathbf{v}$ e os erros $\boldsymbol{\epsilon}$ têm distribuição normal multivariada com média zero, são independentes, com matrizes de variâncias e covariâncias $\mathbf{G}$ ($q \times q$) e $\mathbf{R}$ ($n \times n$), respectivamente.

$$\text{Var}[\mathbf{v}] = \text{Var}(\mathbf{v}) = \mathbf{G}$$

$$\text{Var}[\boldsymbol{\epsilon}] = \text{Var}(\boldsymbol{\epsilon}) = \mathbf{R}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\epsilon} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{G}(\mathbf{y}) & 0 \\ 0 & \mathbf{R}(\rho) \end{bmatrix} \right)$$

Deste modo, a variância do modelo marginal de $\mathbf{y}$ é dado por:

$$\mathbf{V} = \text{Var}(\mathbf{y}) = \text{Var}(\mathbf{X}\boldsymbol{\beta}) + \text{Var}(\mathbf{Z}\mathbf{u}) + \text{Var}(\boldsymbol{\epsilon}) = \mathbf{Z}\text{Var}(\mathbf{u})\mathbf{Z}' + \mathbf{R} = \mathbf{Z}\mathbf{G}\mathbf{Z}' + \mathbf{R}$$

2.4.4 Modelos lineares mistos para experimentos envolvendo medidas repetidas

A formulação do modelo linear misto para medidas repetidas é mostrada a seguir:

$$y_i = \mathbf{X}'_i\boldsymbol{\beta} + \mathbf{Z}'_i\mathbf{v}_i + \epsilon_i$$

em que y é o vetor resposta ($n_i \times 1$) para a unidade experimental i , $\mathbf{X}_i$ é a matrix de incidência para os efeitos fixos ($n_i \times p$) para a unidade experimental i , e $\boldsymbol{\beta}$ é o vetor de

coeficientes para efeitos fixos ($p \times 1$), $\mathbf{Z}_i$ é a matriz de incidência para os efeitos aleatórios ($n_i \times q$) para unidade experimental i , $\mathbf{v}_i$ é o vetor de efeitos aleatórios ($q \times 1$), e ϵ_i é o vetor de erros para a unidade experimental i com média 0 e covariância $\mathbf{R}_i$. Ainda, n_i é o número de medidas repetidas na unidade experimental i e N é o número de unidades experimentais. Enquanto β é o mesmo para todas as unidades experimentais, $\mathbf{v}_i$ pode variar dependendo do sujeito.

O vetor de resíduos para a unidade experimental i é:

$$e_i = y_i - X_i\beta$$

Para visualizar como a formulação do modelo linear misto para as unidades experimentais no caso de experimentos com medidas repetidas se relaciona com a forma geral apresentada anteriormente, tem-se:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & Z_N \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_N \end{bmatrix}, \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_N \end{bmatrix}$$

Um dos aspectos que distingue modelos lineares mistos ou mistos generalizados daqueles fixos é a flexibilidade quanto aos erros aleatórios e a modelagem dos componentes de variância dos efeitos aleatórios. Modelos lineares mistos permitem a modelagem tanto de variâncias heterogêneas quanto de correlações heterogêneas através da especificação da estrutura de covariância para v e ϵ . As estimativas da matriz de covariância são obtidas através de máxima verossimilhança restrita, e os testes de hipóteses para os efeitos fixos são feitos utilizando testes F .

Os efeitos aleatórios podem estar contidos nas matrizes $\mathbf{G}$ e/ou $\mathbf{R}$ e modelos marginais não possuem necessariamente matriz $\mathbf{G}$. A matriz $\mathbf{V}$ consiste em dois componentes que são utilizados para modelar heterocedasticidade e correlação: um componente de covariância associada ao erro aleatório, $\mathbf{R}$, e de covariância intragrupo, $\mathbf{ZGZ}'$. Em algumas aplicações, o componente intragrupo $\mathbf{R}$ é utilizado para modelar diretamente a matriz de variância-covariância dos dados sem a necessidade de incorporar efeitos aleatórios no modelo como no caso de experimento com medidas repetidas.

A matriz $\mathbf{G}$ é a matriz de variâncias e covariâncias para os efeitos aleatórios $\mathbf{v}$. Geralmente, quando a matriz $\mathbf{G}$ é utilizada para especificar a estrutura da matriz de covariância de $\mathbf{y}$, a estrutura da matriz $\mathbf{R}$ é simplesmente $\sigma^2 \mathbf{I}$.

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\text{sub}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{G}_{\text{sub}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{G}_N \end{bmatrix}$$

em que a dimensão de $\mathbf{G}_{\text{sub}}$ é $q \times q$, onde q é o número de efeitos aleatórios para cada unidade experimental. A matriz $\mathbf{R}$ é a matriz de variâncias e covariâncias dos erros, e. Quando a matriz $\mathbf{R}$ é utilizada para especificar a estrutura de covariância de $\mathbf{y}$, a matriz $\mathbf{G}_{\text{sub}}$ não é utilizada.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{R}_N \end{bmatrix}$$

em que $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_N$ possuem a mesma estrutura.

2.4.5 Estimação e inferência sobre efeitos fixos e aleatório

O método de máxima verossimilhança restrita é o procedimento padrão para estimar as matrizes de covariância $\mathbf{G}$ e $\mathbf{R}$, e posteriormente β . A estimação de $\mathbf{G}$ e $\mathbf{R}$, requer a especificação da estrutura de variância e covariância. O método da máxima verossimilhança consiste na obtenção de estimadores que maximizem a função densidade de probabilidade conjunta das observações, em relação aos efeitos fixos e aos componentes de variância. Dada as estimativas de máxima verossimilhança restrita para $\mathbf{G}$ e $\mathbf{R}$, os efeitos fixos β e aleatórios $\mathbf{v}$ são estimados pelas equações de modelos mistos descritas por Henderson (1984). As equações de modelos mistos são encontradas através da maximização da função de densidade de probabilidade conjunta de $\mathbf{y}$ e $\mathbf{u}$. A solução β é equivalente aos estimadores de mínimos quadrados generalizados, pois as equações normais de mínimos quadrados ordinários são um caso especial no qual o modelo não contém efeitos aleatórios e as observações são independentes e homocedásticas.

Se $\mathbf{G}$ e $\mathbf{R}$ são conhecidos, a solução $\hat{\beta}$ é o melhor estimador linear não enviesado (BLUE) de β and $\hat{v}$ é o melhor preditor linear não enviesado de v (BLUP). O termo "melhor" é utilizado no sentido de minimizar o quadrado médio do erro entre todos os estimadores e preditores lineares, respectivamente. No entanto, equações de modelos mistos para β e v são frequentemente solucionadas em termos de $\mathbf{G}$ e $\mathbf{R}$ desconhecidos. Assim, estimativas de máxima verossimilhança restrita para $\mathbf{G}$ e $\mathbf{R}$ podem ser substituídas nas expressões para $\hat{\beta}$ e $\hat{v}$. Os estimadores resultantes são denominados de BLUE empírico (EBLUE) e BLUP empírico (EBLUP).

Existem diversas abordagens para estimação dos parâmetros desconhecidos de uma distribuição de probabilidade. Apesar do método de quadrados mínimos ser bastante utilizado para modelos lineares com apenas efeitos fixos, tais métodos não generalizam bem para modelos com efeitos aleatórios, como no caso de modelos mistos. O método das equações de modelos mistos (EMM) de Henderson tem sido amplamente utilizado por ter conexão com a estimação de máxima verossimilhança para os parâmetros de variância $\mathbf{G}$ e $\mathbf{R}$. O método da máxima verossimilhança consiste na obtenção de estimadores que maximizem a função de densidade das observações, em relação aos efeitos fixos e aos componentes de variância. O objetivo é maximizar a função de máxima verossimilhança em relação aos parâmetros desconhecidos. A principal vantagem dessa abordagem é a capacidade de lidar com uma classe muito mais ampla de estruturas de variância e covariância comparado com métodos anteriores. No entanto, estimadores de máxima verossimilhança possuem viés, especialmente para o caso de amostras pequenas, porque não levam em consideração a perda de graus de liberdade na estimação dos efeitos fixos. Estimadores de máxima verossimilhança tende a produzir estimativas dos componentes de variância que são muito pequenas, especialmente em experimentos com amostras pequenas.

O método da máxima verossimilhança restrita ou residual é considerado o método padrão para a estimação dos componentes de variância e covariância nas matrizes $\mathbf{G}$ e $\mathbf{R}$ tanto para conjuntos de dados balanceados e como para desbalanceados. As combinações lineares são os resíduos obtidos depois do ajuste dos efeitos fixos. Assim, o método da máxima verossimilhança restrita leva em consideração a perda dos graus de liberdade pela estimação dos efeitos fixos.

Considere que Y seja uma variável aleatória com distribuição de probabilidade $f(y|\theta)$, dependente do parâmetro $\theta = [\mu, \sigma^2]$. Assume que $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ seja uma amostra aleatória da distribuição de Y . Como os valores de Y são independentes, a distribuição de probabilidade conjunta é dada pelo produto das distribuições individuais:

$$f(Y_1, Y_2, \dots, Y_n | \theta) = f(Y_1|\theta)f(Y_2|\theta)\dots f(Y_n|\theta) = \prod_{i=1}^n f(Y_i | \theta)$$

A equação acima significa que a probabilidade de se observar $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ condicional ao parâmetro θ para o qual o pesquisador estaria interessado em estimar um valor apropriado.

Nesse sentido, o conceito de verossimilhança é encontrar o valor do parâmetro θ que é mais provável de ter gerado os dados observados, a partir da maximização da função de densidade em relação aos parâmetros. Suponha que Y tem distribuição normal com médias μ e variância σ^2 de forma que $\theta = [\mu, \sigma^2]$ é o vetor contendo os parâmetros da distribuição. Para uma amostra aleatória de tamanho n , a função de verossimilhança é dada por:

$$L(\theta|Y_1, Y_2, \dots, Y_n) = L(\theta|Y_1)f(\theta|Y_2)\dots f(\theta|Y_n) = \prod_{i=1}^n f(\theta|Y_i)$$

A função de verossimilhança é uma distribuição de probabilidade conjunta com o parâmetro θ condicionado aos valores observados Y_i . Assim, o método da máxima verossimilhança consiste na obtenção de estimadores de θ que maximizem a função de densidade das observações, em relação aos efeitos fixos e aos componentes de variância. O valor do parâmetro θ que maximiza a função de máxima verossimilhança é chamada de estimador de máxima verossimilhança $\hat{\theta}$. No entanto, pode ser mais conveniente encontrar valores para θ que maximizem o logaritmo natural de $\ln L(\theta|Y_i)$ do que é para encontrá-lo para $L(\theta|Y_i)$.

Assim, a distribuição marginal de y em modelos lineares mistos é dada por:

$$y \sim N(\mathbf{X}\beta, \mathbf{V})$$

E a função logarítmica de verossimilhança de y por:

$$\log L(\beta, \Phi|y_i) = -\frac{N}{2} \log(2\pi) - \frac{N}{2} \log(\sigma^2) - \log(V) - \frac{1}{\sigma^2} (y - X\beta)' V^{-1} (y - X\beta)$$

As soluções de mínimos quadrados generalizados para $\hat{\beta}$ são dadas por:

$$\hat{\beta} = (X' \hat{V}^{-1} X)^{-1} X' \hat{V}^{-1} y$$

com a variância e covariância estimadas iguais a:

$$\hat{\Sigma} = \text{var}(\hat{\beta}) = (X' \hat{V}^{-1} X)^{-1}$$

2.5 Estruturas de covariância

Existem duas questões principais na análise de medidas repetidas: a construção de um modelo adequado para a média e a seleção de um modelo adequado, parcimonioso, para a estrutura de covariância das medidas repetidas. A correlação intraclasse, ou correlação entre as observações tomadas repetidamente na mesma unidade experimental (parcela), geralmente segue padrões distintos que permitem projetar uma variedade de padrões de covariância para refletir tais relações (CONDORELLI et al., 2018; GBUR et al., 2012; LI et al., 2016).

Um modelo com uma estrutura de covariância adequada é fundamental para que o pesquisador chegue a conclusões acuradas do ensaio agrícola com medidas repetidas. Caso a correlação entre as medidas repetidas para as unidades experimentais seja ignorada através do uso de um modelo de covariância muito simples, a taxa de erro do tipo I para os testes de hipótese sobre os efeitos fixos aumenta. Pesquisas mostram que inferência estatística de experimentos com medidas repetidas pode ser seriamente prejudicada pela escolha inadequada de modelos de covariância (KENWARD e ROGER, 1997; KESELMAN et al., 2000).

Alguns dos padrões de covariância mais comuns para aplicações em experimentos agrícolas incluem: o padrão diagonal com variâncias homogêneas (I), e com variâncias heterogêneas, também conhecido como componentes de variâncias (CV), no qual as covariâncias são nulas.

$$\mathbf{G_I} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & & & \\ & \sigma^2 & & \\ & & \sigma^2 & \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R_{CV}} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \sigma_3^2 & \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

Outro padrão de covariâncias é o modelo de simetria composta com variâncias homogêneas (CS) e com variâncias heterogêneas (CSH). O padrão de CS é o padrão mais simples, não trivial, assumindo correlação constante entre medidas repetidas. Tal correlação é conhecida como correlação intragrupo.

A matriz de variâncias e covariâncias para o padrão CS e CSH, e a matriz de correlações são apresentadas a seguir:

$$\mathbf{R_{SC}} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \rho\sigma^2 & \rho\sigma^2 & \rho\sigma^2 \\ & \sigma^2 & \rho\sigma^2 & \rho\sigma^2 \\ & & \sigma^2 & \rho\sigma^2 \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R_{SCH}} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho\sigma_1\sigma_2 & \rho\sigma_1\sigma_3 & \rho\sigma_1\sigma_4 \\ & \sigma_2^2 & \rho\sigma_2\sigma_3 & \rho\sigma_2\sigma_4 \\ & & \sigma_3^2 & \rho\sigma_3\sigma_4 \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 1 & \rho & \rho & \rho \\ & 1 & \rho & \rho \\ & & 1 & \rho \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

Para aqueles conjuntos de dados provenientes de experimentos com medidas repetidas que seguem um padrão de correlações constantes para todos os pontos de tempo ou espaço, o padrão SC pode produzir estimativas estatisticamente eficientes e consistentes dos parâmetros. No entanto, a estrutura dos erros tende a ser frequentemente mais complexa do que as impostas pelos padrões anteriores,

particularmente para experimentos com medidas repetidas, em que observações na mesma unidade experimental tendem não somente a estar correlacionadas, mas correlações também tendem a diminuir com o aumento da distância entre os pontos de tempo ou espaço.

Outros padrões baseados em regras de correlação têm sido desenvolvidos para o contexto de medidas repetidas. O padrão de covariância residual não estruturado (UN) representa o extremo oposto aos padrões mais anteriores mais simples. Nele, todas as covariâncias são arbitrárias, permitindo não somente variâncias desiguais, mas também covariâncias desiguais entre as observações. No padrão não estruturado (UN), o pressuposto é que todas as correlações são diferentes para todos os elementos da matriz de variância e covariância. A matriz de variâncias e covariâncias para o padrão UN e UNH, e a matriz de correlações são apresentadas a seguir:

$$\mathbf{R}_{UN} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \rho_{12}\sigma^2 & \rho_{13}\sigma^2 & \rho_{14}\sigma^2 \\ & \sigma^2 & \rho_{23}\sigma^2 & \rho_{24}\sigma^2 \\ & & \sigma^2 & \rho_{34}\sigma^2 \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{UNH} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \rho_{13}\sigma_1\sigma_3 & \rho_{14}\sigma_1\sigma_4 \\ & \sigma_2^2 & \rho_{23}\sigma_2\sigma_3 & \rho_{24}\sigma_2\sigma_4 \\ & & \sigma_3^2 & \rho_{34}\sigma_3\sigma_4 \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r}_{UN} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \rho_{13} & \rho_{14} \\ & 1 & \rho_{23} & \rho_{24} \\ & & 1 & \rho_{34} \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

Apesar da flexibilidade, os padrões de covariâncias UN e UNH requerem a estimação de muitos parâmetros. Um padrão de correlação sem estrutura necessita da estimação de $p \times (p - 1) / 2$ correlações distintas, com p sendo o número de medidas repetidas.

Para situações nas quais os dados estão organizados em sequência como experimentos com medidas repetidas, vários padrões de variância e covariância residuais adicionais estão disponíveis com complexidades intermediárias entre o padrão de simetria composta imposto pela ANOVA para medidas repetidas e o padrão

não estruturado. Nesse caso, é importante considerar se os intervalos entre as medidas repetidas, são iguais ou não.

2.5.1 Padrões para intervalos de tempo iguais

Para experimentos com intervalos iguais, pode-se considerar os padrões autorregressivos (AR). Dentre os modelos autoregressivos, aqueles de primeira ordem são talvez os mais utilizados para modelar o padrão de variância e covariância residual em experimentos com medidas repetidas. Neles, as correlações entre observações de níveis adjacentes é ρ , entre observações separadas por dois níveis ρ^2 , e assim por diante. O padrão autorregressivo de primeira ordem pode assumir variância homogêneas AR (1) ou heterogêneas ARH (1) entre em todos os pontos de tempo, além de um efeito decrescente da correlação intragrupo ρ^j ($j = 1, \dots, p - 1$). Esse padrão é denominado de primeira ordem porque depende apenas do termo residual no ponto de tempo anterior. Dada essa hipótese, esse padrão de covariâncias requer a especificação de apenas dois parâmetros, σ^2 e ρ . Dada sua simplicidade, o padrão autorregressivo é utilizado quando observações estão igualmente espaçadas e a correlação intragrupo não muda abruptamente no tempo ou espaço.

As matrizes de variâncias e covariâncias para o padrão AR (1) e ARH (1), e a matriz de correlações são apresentadas a seguir:

$$\mathbf{R}_{\text{AR}(1)} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \rho^1 \sigma^2 & \rho^2 \sigma^2 & \rho^3 \sigma^2 \\ & \sigma^2 & \rho^1 \sigma^2 & \rho^2 \sigma^2 \\ & & \sigma^2 & \rho^1 \sigma^2 \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{\text{ARH}(1)} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho^1 \sigma_1 \sigma_2 & \rho^2 \sigma_1 \sigma_3 & \rho^3 \sigma_1 \sigma_4 \\ & \sigma_2^2 & \rho^1 \sigma_2 \sigma_3 & \rho^2 \sigma_2 \sigma_4 \\ & & \sigma_3^2 & \rho^1 \sigma_3 \sigma_4 \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 1 & \rho^1 & \rho^2 & \rho^3 \\ & 1 & \rho^1 & \rho^2 \\ & & 1 & \rho^1 \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

Por exemplo, a matriz de correlação para um padrão autorregressivo de primeira ordem com $\rho = 0.6$ e variância homogênea é dada por:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 1 & 0.6 & 0.36 & 0.216 \\ & 1 & 0.6 & 0.36 \\ & & 1 & 0.6 \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

No entanto, esse padrão pode não ser flexível o suficiente para refletir a heterogeneidade através do tempo em experimentos com medidas repetidas. Por isso, pesquisadores também desenvolveram padrões autoregressivos mais refinados para abordar padrões de covariância residual mais complexos.

Outro padrão de covariância importante é denominado de Toeplitz (TOEP), no qual a correlação entre observações em níveis de fatores adjacentes é ρ^d , em que d representa a unidade de distância entre duas medidas repetidas. Este modelo é um pouco menos restritivo do que um modelo autorregressivo.

Nesse caso, são especificados n parâmetros de variância e covariância, um para a variância constante e $n - 1$ para correlações. Essa estrutura se parece com o padrão AR (1), exceto a especificação da correlação é ρ_d ao invés de ρ^d , onde d representa a unidade de distância entre duas observações repetidas. Quando comparado com a estrutura AR (1), o modelo TOEP é mais flexível dada a especificação de ρ_d e, portanto, esse padrão pode ser utilizado para capturar padrões de variância mais complexos. Além disso, TOEP permite especificar n parâmetros de variância, enquanto AR (1) tem apenas 2.

As matrizes de variâncias e covariâncias para o padrão TEOP e TOEPH, e a matriz de correlações são apresentadas a seguir:

$$\mathbf{R}_{\text{TOEP}} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 & \sigma^2 \rho_2 & \sigma^2 \rho_3 \\ & \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 & \sigma^2 \rho_2 \\ & & \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{\text{TOEPH}} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho_1 & \sigma_1 \sigma_3 \rho_2 & \sigma_1 \sigma_4 \rho_3 \\ & \sigma_2^2 & \sigma_2 \sigma_3 \rho_1 & \sigma_2 \sigma_4 \rho_2 \\ & & \sigma_3^2 & \sigma_3 \sigma_4 \rho_1 \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \rho_3 \\ & 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ & & 1 & \rho_1 \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

A matriz de correlação para um padrão TOEP com $\rho_1 = 0.7$, $\rho_2 = 0.5$ e $\rho_3 = 0.3$ é dada por:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0.7 & 0.5 & 0.3 \\ & 1 & 0.7 & 0.5 \\ & & 1 & 0.7 \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

As matrizes de variâncias e covariâncias para o padrão TEOP (2) e TOEPH (2), e a matriz de correlações são apresentadas a seguir:

$$\mathbf{R}_{\text{TOEP (2)}} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 & 0 & 0 \\ & \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 & 0 \\ & & \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{\text{TOEPH (2)}} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho_1 & 0 & 0 \\ & \sigma_2^2 & \sigma_2 \sigma_3 \rho_1 & 0 \\ & & \sigma_3^2 & \sigma_3 \sigma_4 \rho_1 \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & 0 & 0 \\ & 1 & \rho_1 & 0 \\ & & 1 & \rho_1 \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

A matriz de correlação para um padrão TOEP (2) com $\rho_1 = 0.7$ é dada por:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0.7 & 0 & 0 \\ & 1 & 0.7 & 0 \\ & & 1 & 0.7 \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

As matrizes de variâncias e covariâncias para o padrão TOEP (3) e TOEPH (3), e a matriz de correlações são apresentadas a seguir:

$$\mathbf{R}_{\text{TOEP (3)}} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 & \sigma^2 \rho_2 & 0 \\ & \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 & \sigma^2 \rho_2 \\ & & \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{\text{TOEPH}(3)} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1\sigma_2\rho_1 & \sigma_1\sigma_3\rho_2 & 0 \\ & \sigma_2^2 & \sigma_2\sigma_3\rho_1 & \sigma_2\sigma_4\rho_2 \\ & & \sigma_3^2 & \sigma_3\sigma_4\rho_1 \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & 0 \\ & 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ & & 1 & \rho_1 \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

A matriz de correlação para um padrão TOEP (3) com $\rho_1 = 0.7$, $\rho_2 = 0.5$ é dada por:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0.7 & 0.5 & 0 \\ & 1 & 0.7 & 0.5 \\ & & 1 & 0.7 \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

A estrutura de covariância em experimentos com medidas repetidas pode ser complexa, mas geralmente assume-se que as medidas repetidas dentro das unidades experimentais (sujeitos) são correlacionadas e entre as unidades experimentais independentes. Assim, geralmente, a estrutura de variância marginal é uma matriz em bloco diagonal, facilitando a especificação de diferentes estruturas para cada bloco. No caso em que é esperado que os parâmetros de covariância mudem com os grupos de um fator entre sujeitos, diferentes conjuntos de parâmetros para as matrizes $\mathbf{R}$ e $\mathbf{G}$ podem ser especificados para cada grupo. Como resultado, são produzidos um conjunto de parâmetros de covariâncias que diferem para cada nível do grupo da variável em Cada um dos padrões de correlação tem limitações.

2.5.2 Seleção de modelos de covariâncias

Sob estimativa de máxima verossimilhança residual (REML), a seleção de um modelo de covariância pode ser tratada por meio de comparações dos critérios de informação ou por teste formal de hipóteses dos parâmetros de covariância, para vários modelos candidatos. A comparação de modelos candidatos pode ser realizada com o procedimento Glimmix no programa estatístico SAS com a opção de várias estruturas de covariâncias. Os critérios de informação fornecidos pelo procedimento podem ser utilizados como ferramentas para auxiliar na seleção do modelo mais

adequado. Cinco critérios são fornecidos: critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação de Akaike corrigido (AICC), e o critério de Bayesiano de Schwarz (BIC). Um critério de informação menores significa um modelo mais adequado quanto ao seu ajuste aos dados. O critério AICC é adequado para amostras pequenas, e converge a AIC no caso de amostras maiores. O critério BIC tende a escolher um modelo mais simples que o critério AIC, pois aumenta as penalidades à medida que o número de parâmetros aumenta.

Em geral, se a estrutura de covariância selecionada sub-modela a correlação verdadeira (por exemplo, o modelo de independência usado quando há correlação não desprezível), a taxa de erro tipo I aumenta. Se a estrutura de covariância selecionada modela demais a correlação verdadeira (por exemplo, o modelo UN é usado quando um o modelo AR(1) seria mais adequado), o poder da análise estatística e a parcimônia sofrerá, devido ao aumento do erro do tipo II. Por isso, é importante identificar o modelo mais simples de covariância que contabilize adequadamente para a estrutura de correlação nos dados. Isso maximiza o poder do teste sem comprometer o controle eficaz sobre o erro do tipo I.

Crítérios de informação como AICC ou BIC são utilizados para comparar estruturas de covariância desde que a porção de efeitos fixos do modelo seja o mesmo para todas as estruturas de covariância em consideração. Os critérios de informação são calculados para cada modelo candidato e seus valores são comparados. Os modelos candidatos devem incluir todas as estruturas de covariância consideradas cientificamente plausível no contexto dos dados analisados. Isso requer um entendimento do processo sob investigação. Não é uma questão puramente estatística de escolher o modelo com o menor valor dos critérios de informação. No caso da comparação de duas estruturas de covariância aninhadas (ou seja, pode-se ser obtido do outro, restringindo parte ou toda a covariância parâmetros de desempenho), ainda podem ser realizadas comparações usando um teste de razão de verossimilhança. A estatística do teste da razão de verossimilhança, formada por -2 vezes o logaritmo natural da razão das probabilidades residuais dos modelos comparados tem aproximadamente uma distribuição χ^2 se um dos modelos for um subconjunto do outro.

2.5.3 Qualidade dos estimadores em modelos mistos aplicados a experimentos envolvendo medidas repetidas

O poder estatístico e a taxa de erro do tipo I dos modelos lineares mistos com base em covariâncias AR e em covariâncias UN foram investigados por Gueorguieva e Krystal (2004). Os resultados revelaram uma menor taxa de erro do tipo I para AR. No entanto, os dados simulados já possuíam uma estrutura autorregressiva. Isso indica que um controle de erro do tipo I ideal resulta da estrutura de covariância especificada que corresponde à estrutura de covariância empírica. Em contraste, Kowalchuk et al. (2004) mostrou que UN obteve um desempenho semelhante ao ajuste da estrutura de covariância verdadeira e, sob certas condições, apresentou melhor controle de erro Tipo I.

Goedert et al. (2013) conduziram uma simulação com um conjunto de dados com violação do pressuposto de esfericidade e encontrou poder estatístico superior de MLM-UN quando comparado com ANOVA para medidas repetidas, particularmente para pequenas amostras. O autor recomenda o uso de modelos lineares mistos com modelo de covariância UN baseado em estatística F ao invés de ANOVA para medidas repetidas. Gueorguieva e Krystal (2004) também encontraram taxas de erro do tipo I semelhantes para MLM-UN e ANOVA para medidas repetidas com correção de Greenhouse-Geisser em um estudo de simulação com quatro pontos de tempo. No entanto, as taxas de erro Tipo I foram ligeiramente mais corretas para MLM com base na simetria composta (MLM-SC). Harverkamp e Beauducel (2017) avaliaram a taxa de erro do tipo I experimentos com dados de medidas repetidas simulados, e mostraram que elas não foram afetadas pelo tamanho amostral. Os autores avaliaram a taxa de erro do tipo I para as seguintes situações: ANOVA para medidas repetidas sem correção nos testes F, ANOVA com correção, MLM-CS, e MLM-UN. Todas as situações foram avaliadas sob a condição de violação e não violação do pressuposto de esfericidade e para tamanhos amostrais de $n = 20, 40, 80$ e 100 , como também para os seguintes pontos de tempo $m = 3, 6$ e 9 . As simulações foram baseadas em populações com e sem violação da suposição de esfericidade. Os resultados mostraram quando o pressuposto de esfericidade foi violado e o tamanho amostral foi pequeno, o método de ANOVA para medidas repetidas com correção dos testes F foi superior. Os resultados mostraram um viés progressivo para ANOVA (medidas repetidas) e MLM-CS no caso de violação do pressuposto de simetria composta. O

viés aumentou com o número de pontos de tempo, embora o viés já fosse suficientemente grande para 3 pontos de tempo. Os autores relataram que o efeito foi observado independente do tamanho amostral e do número de pontos no tempo. Foi também observado um aumento na taxa de erro do tipo I para MLM-UN com 9 pontos de tempo com tamanho amostral menores ou iguais a 60. Esse efeito foi observado tanto nos dados que satisfizeram o pressuposto de esfericidade como naqueles que violaram. Os autores recomendam cuidado ao utilizar MLM-UN devido ao viés progressivo. Além disso, os pesquisadores relataram viés no método ANOVA mesmo com correções nos testes F, particularmente para situações com mais pontos de observação no tempo. Contudo, o estudo foi limitado a análise do erro do tipo I intraclasse e os modelos não continham nenhum efeito entre grupos, como tratamentos de interesse. Por isso, os resultados dos estudos de simulação sobre a especificação mais adequada para a obtenção de um melhor controle do erro do tipo I ainda não são conclusivos, carecendo mais estudos com diferentes cenários de modelagens.

Os padrões de correlação estruturados refletem suposições especiais sobre as correlações entre as medidas repetidas, no caso de que eles tendem a diminuir com o passar do tempo ou espaço. As suposições sobre a estrutura de covariância real dos dados introduzem o risco de escolher um padrão muito simples, o que poderia inflar a taxa de erro tipo I, ou muito complexo o que poderia acarretar a perda do poder estatístico. Apesar dos estudos com modelos lineares mistos, os resultados ainda não são conclusivos sobre o modelo mais adequado para os diferentes cenários experimentais, e sobre a consequência não se considerar a estrutura que proporciona o melhor ajuste na análise dos dados. Muitos dos estudos disponíveis na literatura são específicos a poucos cenários fora do contexto agrícola, dificultando a aplicação mais adequada de modelos lineares mistos por pesquisadores não estatísticos, já que a aplicação de modelos mistos requer a especificação de parâmetros além daqueles padrões dos programas estatísticos.

Nesse contexto, as hipóteses do presente estudo foram:

1. Pressupostos inadequados sobre a estrutura de covariância de experimentos com medidas repetidas podem alterar a taxa de erro tipo I, alterando a conclusão sobre os efeitos fixos.

2. Especificação de estruturas de covariância muito simples para conjuntos de dados com estruturas mais complexas podem acarretar o aumento da taxa de erro tipo I em inferências sobre efeitos fixos.
3. Especificação incorreta de estruturas de covariância muito complexas para medidas repetidas pode acarretar a perda do poder estatístico.
4. Especificação de estruturas de covariância com complexidades intermediárias, como o padrão AR (1) ou TOEP, podem fornecer uma melhor relação entre a taxa de rejeição da hipótese nula e poder estatístico.
5. Um controle ideal da taxa de erro do tipo I resulta da estrutura de covariância especificada que corresponde à estrutura de covariância empírica do conjunto de dados.
6. A quantidade de medidas repetidas influencia a taxa de rejeição da hipótese nula, pois um número maior de medias repetidas significa um número maior de parâmetros a serem estimados, e, portanto, uma redução do poder estatístico.
7. Um maior número de medidas repetidas necessita de um número maior de repetições para atingir patamares adequados de poder estatístico.

Para abordar as hipóteses anteriores, o presente estudo teve como objetivo geral a aplicação e avaliação de modelos lineares mistos em conjuntos de dados provenientes de experimentos com medidas repetidas simulados com diferentes cenários experimentais que variaram quanto a estrutura de covariância dos efeitos aleatórios, o número de medidas repetidas, e o tamanho amostral.

O objetivo específico foi a avaliação do efeito da especificação de estruturas paramétricas de matrizes de variância e covariância (matriz **G**) sobre o ajuste dos modelos mistos, sobre a estimativa de erro do tipo I através dos testes de hipótese sobre os efeitos fixos, e sobre o poder estatístico em experimentos com medidas repetidas simulados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Simulação dos cenários experimentais

Para viabilizar a avaliação do efeito da utilização de modelos lineares mistos com diferentes pressupostos acerca da matriz de covariância em experimentos com medidas repetidas, foi gerada uma série de conjuntos de dados provenientes de experimentos simulados baseados em amostras aleatórias de uma distribuição normal multivariada. Os conjuntos de dados foram gerados de forma que tivessem diferentes padrões de covariância entre as medidas repetidas, diferentes números de medidas repetidas, e diferentes tamanhos amostrais.

Os experimentos simulados consistiram em um delineamento completamente casualizado com 2 tratamentos, 4 ou 8 medidas repetidas, 4, 8 e 12 repetições por tratamento e 14 padrões de covariância entre as medidas repetidas. Para cada cenário avaliado, foram gerados 10,000 conjuntos de dados que foram posteriormente analisados com modelos lineares mistos com diferentes pressupostos acerca da matriz de covariância empírica dos dados, e avaliados quanto a taxa de erro do tipo I e ao poder estatístico dos testes de hipótese para a interação entre tratamento e medidas repetidas, e ao ajuste do modelo aos dados através dos critérios de informação BIC.

Os padrões da matriz de covariância Σ entre as medidas repetidas para as simulações consistiram em 14 estruturas: I, SC, AR (1), TOEP, TOEP (2), TOEP (3) e BANDED (3), e suas respectivas versões com variâncias heterogêneas: CV, SCH, ARH(1), TOEPH, TOEPH (2), TOEPH (3), BANDEDH (3). Além disso, o tamanho das matrizes Σ variou entre 4 x 4 ou 8 x 8, correspondendo ao cenário com 4 e 8 medidas repetidas no tempo ou espaço.

Para cada cenário de simulação, um vetor de desvios normais aleatórios multivariado com média 0 e matriz de covariância Σ foi gerado. Para cada simulação, os vetores foram dos seguintes tamanhos: (32, 1), (64, 1), (96, 1) (160, 1) e (192, 1), e foram gerados com a função `multivariate_normal` (μ, Σ), em que μ é o vetor de médias, que foi ajustado para $\mu = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$ ou $\mu = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ dependendo do número de medidas repetidas, e Σ é a matriz de covariância das médias, que variou dependendo dos padrões de covariância em avaliação.

Os padrões avaliados para a matriz Σ são apresentados a seguir:

$$\Sigma_I = \begin{bmatrix} \sigma^2 & & & \\ & \sigma^2 & & \\ & & \sigma^2 & \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{CV} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \sigma_3^2 & \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{SC} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \sigma^2 \rho & \sigma^2 \rho & \sigma^2 \rho \\ & \sigma^2 & \sigma^2 \rho & \sigma^2 \rho \\ & & \sigma^2 & \sigma^2 \rho \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{SCH} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho & \sigma_1 \sigma_3 \rho & \sigma_1 \sigma_4 \rho \\ & \sigma_2^2 & \sigma_2 \sigma_3 \rho & \sigma_2 \sigma_4 \rho \\ & & \sigma_3^2 & \sigma_3 \sigma_4 \rho \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{AR(1)} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \sigma^2 \rho^1 & \sigma^2 \rho^2 & \sigma^2 \rho^3 \\ & \sigma^2 & \sigma^2 \rho^1 & \sigma^2 \rho^2 \\ & & \sigma^2 & \sigma^2 \rho^1 \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{ARH(1)} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho^1 & \sigma_1 \sigma_3 \rho^2 & \sigma_1 \sigma_4 \rho^3 \\ & \sigma_2^2 & \sigma_2 \sigma_3 \rho^1 & \sigma_2 \sigma_4 \rho^2 \\ & & \sigma_3^2 & \sigma_3 \sigma_4 \rho^1 \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{TOEP} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 & \sigma^2 \rho_2 & \sigma^2 \rho_3 \\ & \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 & \sigma^2 \rho_2 \\ & & \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{TOEPH} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho_1 & \sigma_1 \sigma_3 \rho_2 & \sigma_1 \sigma_4 \rho_3 \\ & \sigma_2^2 & \sigma_2 \sigma_3 \rho_1 & \sigma_2 \sigma_4 \rho_2 \\ & & \sigma_3^2 & \sigma_3 \sigma_4 \rho_1 \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{\text{TOEP}(2)} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 & 0 & 0 \\ & \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 & 0 \\ & & \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{\text{TOEPH}(2)} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho_1 & 0 & 0 \\ & \sigma_2^2 & \sigma_2 \sigma_3 \rho_1 & 0 \\ & & \sigma_3^2 & \sigma_3 \sigma_4 \rho_1 \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{\text{TOEP}(3)} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 & \sigma_1 \sigma_3 \rho_2 & 0 \\ & \sigma^2 & \sigma^2 \rho_1 & \sigma^2 \rho_2 \\ & & \sigma^2 & \sigma_3 \sigma_4 \rho_1 \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{\text{TOEPH}(3)} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho_1 & \sigma_1 \sigma_3 \rho_2 & 0 \\ & \sigma_2^2 & \sigma_2 \sigma_3 \rho_1 & \sigma_2 \sigma_4 \rho_2 \\ & & \sigma_3^2 & \sigma_3 \sigma_4 \rho_1 \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{\text{BANDED}(3)} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho & \sigma_1 \sigma_3 \rho & 0 \\ & \sigma_2^2 & \sigma_2 \sigma_3 \rho & \sigma_2 \sigma_4 \rho \\ & & \sigma_3^2 & \sigma_3 \sigma_4 \rho \\ & & & \sigma_4^2 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{\text{BANDEDH}(3)} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \sigma^2 \rho & \sigma^2 & 0 \\ & \sigma^2 & \sigma^2 \rho & \sigma^2 \rho \\ & & \sigma^2 & \sigma^2 \rho \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix}.$$

Para as matrizes Σ_{SC} , Σ_{SCH} , $\Sigma_{\text{AR}(1)}$ e $\Sigma_{\text{ARH}(1)}$, ρ foi ajustado para 0.75. Para as matrizes Σ_{TOEP} e Σ_{TOEPH} , ρ_1 , ρ_2 e ρ_3 foram 0.8, 0.6 e 0.4, respectivamente. Para as matrizes $\Sigma_{\text{TOEP}(2)}$ e $\Sigma_{\text{TOEPH}(2)}$, ρ_1 e ρ_2 foram 0.8 e 0.6, respectivamente. Para as matrizes $\Sigma_{\text{TOEP}(3)}$ e $\Sigma_{\text{TOEPH}(3)}$, ρ_1 foi ajustado para 0.8. Para as matrizes $\Sigma_{\text{BANDED}(3)}$ e $\Sigma_{\text{BANDEDH}(3)}$, ρ_1 foi ajustado para 0.8. Para a construção das matrizes anteriores, duas matrizes de tamanho (4 x 4) e (8 x 8) com todos os elementos iguais a 1 serviram de modelo, a partir da qual foram empregadas estruturas de repetição para realizar iterações nos elementos das matrizes a fim de se obter a estrutura desejada (Apêndice B).

Os padrões identidade, componentes de variâncias e simetria composta foram incluídos no estudo como referência daquilo que seria o conjunto de dados com padrão ideal para os pressupostos exigidos pela tradicional ANOVA e ANOVA para medidas repetidas. As simulações foram obtidas através de um código Python escrito majoritariamente com os pacotes Numpy, Pandas e Scipy. Posteriormente, todos os conjuntos de dados foram submetidos a análise estatística utilizando um código em SAS majoritariamente através do procedimento Glimmix para análise dos modelos lineares mistos com diferentes pressupostos acerca do padrão de covariância entre as medidas repetidas.

Para cada cenário simulado foram gerados 10.000 conjuntos de dados que foram analisados utilizando modelos lineares mistos com a acomodação dos seguintes padrões de covariância: VC, CS, CSH, AR (1), ARH (1), TOEP, TOEPH, TOEP (2), TOEPH(2), TOEP (3) e TOEPH (3).

3.2 Especificação dos efeitos dos fatores principais e da interação nas simulações

A partir dos vetores de desvios aleatórios simulados para cada cenário considerado, foram criados modelos de experimentos com medidas repetidas seguindo o modelo especificado em 2.5.2., com um fator entre sujeitos (tratamento) com dois níveis, um fator intrassujeito (tempo) com 4 ou 8 níveis e a interação tratamento x tempo.

Para a determinação do tamanho dos efeitos, considerou-se o conceito de diferença mínima detectável (DMD) e de padrão do efeito (PE). Diferença mínima detectável consiste na diferença entre o maior e o menor efeito associado com um fator. Tal diferença representa a menor diferença entre dois níveis de um fator, e o efeito real utilizado na simulação foi dado pela fórmula:

$$\text{Efeito} = \text{DMD} \times \text{PE}$$

Em todas as simulações com 4 medidas repetidas, o padrão do fator de medidas repetidas foi +0.5, +0.125, -0.125, -0.5, enquanto para as simulações com 8

medidas repetidas, o padrão foi +0.5, +0.125, 0, -0.125, -0.250, -0.35, -0.45 -0.5. A diferença mínima detectável foi ajustada para 10.

3.3 Determinação da taxa de erro do tipo I e poder dos testes de hipóteses

Para o estudo da taxa de erro do tipo I de diferentes modelos mistos (avaliação da taxa de rejeição de H_0 quando este for falso), o padrão dos efeitos principais foi +0.5 e + 0.5, e a diferença mínima detectável foi mantida em 1. Para o efeito da interação, o padrão foi o produto Kronecker dos padrões dos efeitos principais, e a diferença mínima detectável foi também foi mantida em 1. Para não perder o senso de generalização, a variância residual foi ajustada para 1, enquanto a variância intrassujeito foi de 2^2 para os conjuntos de dados com variância homogênea, e variou entre 1.25^2 e 3.00^2 para aqueles com variância heterogênea, a fim de manter a taxa superior ou igual a 4:1 entre a maior e a menor variâncias, critério em muitos testes de heterocedasticidade de variâncias. Dessa forma, como a maioria das observações de uma distribuição normal estão dentro de três desvios padrão, variâncias acima de 1.25^2 estariam virtualmente eliminando a chance de uma diferença significativa para o fator da interação. Portanto, as taxas de erro do tipo I para os testes de hipóteses da interação foram estimadas como a proporção de valores p menores ou iguais a α de um total de 10,000 testes.

Para o estudo do poder estatístico de modelos lineares mistos (avaliação da taxa de rejeição de H_0 quando este for verdadeiro), o padrão dos efeitos principais foi ajustado para -0.5 e +0.5, e a diferença mínima detectável foi de 1. Para o efeito da interação, o padrão também foi o produto Kronecker dos padrões dos efeitos principais, e a diferença mínima detectável foi também foi ajustada para 2. Nesse caso, a variância residual foi ajustada para 1^2 , enquanto a variância intrassujeito foi de 2^2 para os conjuntos de dados com variância homogênea, e variou entre 1.00^2 e 2.00^2 para aqueles com variância heterogênea, a fim de também manter a taxa superior ou igual a 4:1 entre a maior e a menor variâncias, e proporcionar uma maior possibilidade de diferenças significativas nos conjuntos de dados simulados. As estimativas de poder estatístico dos testes de hipóteses para a interação foram estimadas como a proporção de valores p menores ou iguais a α de um total de 10,000 testes.

3.4 Seleção do modelo de covariância

Os modelos também foram avaliados quanto a habilidade de ajuste aos dados a partir do critério Bayesiano de informação (BIC) fornecidos pelo procedimento Glimmix. A frequência com a qual as estruturas de covariância foram escolhidas pelos critérios de seleção de um total de 10,000 análises foi computada.

3.5 Procedimento glimmix para experimentos envolvendo medidas repetidas

Em modelos lineares mistos, a resposta é modelada como uma soma de três termos: a matriz de delineamento associada aos efeitos fixos multiplicada a direita por um vetor de coeficiente desconhecido, os efeitos aleatórios multiplicados à esquerda pela matriz de design associada e um erro residual. A média da resposta é parametrizada como o primeiro termo na soma acima, uma vez que os efeitos aleatórios e o erro residual são geralmente assumidos como sendo zero. Contanto que essa matriz de delineamento seja de rank completa, não existe outro vetor de coeficiente fornecendo a mesma média. A covariância da resposta é determinada pelas covariâncias dos efeitos aleatórios e do erro residual. Ambos os efeitos aleatórios e o erro residual são considerados como tendo certas distribuições com estruturas de matriz de covariância a serem especificadas. Os parâmetros associados desconhecidos são geralmente restritos em determinados espaços e devem ser estimados.

Em modelos lineares mistos, a matriz de covariância da resposta é modelada como a soma de duas matrizes: o produto da matriz de covariância dos efeitos aleatórios com a matriz de design associada e a matriz de covariância do erro residual. A construção de um modelo linear misto geralmente envolve a seleção das estruturas de matriz de covariância parametrizadas para os efeitos aleatórios e o erro residual. No entanto, mesmo se a matriz de covariância da resposta não for super parametrizada, algumas especificações de estruturas de covariância podem resultar na não identificabilidade dos parâmetros. Ao ajustar tais modelos, o software pode ou não indicar um problema com a identificabilidade do modelo.

O procedimento Glimmix aplica um limite inferior de 0 para todos os componentes de variância no modelo. Se o limite inferior for removido, o valor real do

componente de variância pode ser negativo. Isso quer dizer que não houve variação suficiente na resposta para atribuir qualquer variação ao efeito aleatório, controlando tudo o mais no modelo. Embora não haja nada de errado com os resultados quando os componentes de variância são negativos, alguns estatísticos recomendam remover os efeitos aleatórios do modelo, apesar de ser um componente importante do modelo. Outros estatísticos argumentam que se deve manter o termo do efeito aleatório no modelo mesmo que seja 0. Por exemplo, se o componente de variância for o efeito do bloco, e caso a variância do efeito fosse 0, ainda sim seria importante mantê-lo no modelo, pois faz parte do delineamento do experimento. Outra opção é especificar um limite inferior para evitar que as estimativas se aproximem muito de 0. Nesse experimento, foi utilizada a opção `parms / lowerb = 1e-4,,1e-4` no procedimento Glimmix, como mostrado no exemplo a seguir:

```
proc glimmix;
class tratamento sujeito dias;
model y = tratamento dias tratamento*dias / ddfm=kr;
random dias / residual type = ar(1) subject = sujeito(tratamento);
covtest 'Covariância nula' diagR / estimates;
run;
```

Todas as análises com modelos lineares mistos tiveram convergência superior a 99.9%, a menos que seja mencionado o contrário nas tabelas. Os códigos completos utilizados nesse estudo podem ser encontrados no Apêndice F.

3.6 Algoritmo de simulação

Em resumo, esse estudo consistiu das seguintes etapas:

1. Geração de um conjunto de dados utilizando a linguagem Python com a biblioteca Numpy com base em um vetor aleatório com resposta normal multivariada a fim de gerar um experimento com delineamento inteiramente casualizado com dois tratamentos, 4, 8 ou 12 unidades experimentais (sujeitos) por tratamento, e 4 ou 8 medidas repetidas.
2. Análise estatística do experimento gerado por modelos lineares mistos utilizando o procedimento Glimmix no programa SAS com as seguintes

opções de pressupostos sobre o padrão da estrutura de covariância para a matriz R: CV, SC, SCH, AR (1), ARH (1), TOEP, TOEPH, TOEP (2), TOEPH (2), TOEP (3), TOEPH (3).

3. Repetição da etapa (1) e (2) 10,000 vezes.
4. Registro dos critérios de informação AIC e BIC para avaliação da habilidade de ajuste aos dados para cada conjunto de dado gerado, além da estimação da taxa de erro do tipo I ou do poder do teste de hipótese da interação entre tratamento e medidas repetidas para o nível de significância de 0.05 ou 0.01.
5. Repetição das etapas (1) a (4) utilizando as seguintes matrizes de covariância para a simulação dos dados: I, CV, SC, SCH, AR (1), ARH (1), TOEP, TOEPH, TOEP (2), TOEPH (2), TOEP (3), TOEPH (3), BAND (3), BANDH (3).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Seleção de estruturas de covariância

As Tabelas 1 a 6 (Apêndice A) fornecem as porcentagens de escolha dos padrões de covariância pelo critério de informação BIC para conjunto de dados com os seguintes padrões para a estrutura de covariância empírica dos dados: I, CS, AR, TOEP, TOEP (2), TOEP (3), BAND (3), CV, CSH, ARH, TOEPH, TOEPH (2), TOEPH (3), BANDH (3). Os valores correspondem a proporção de escolha dos modelos de covariância pelo critério de informação BIC relativo à análise de 10,000 conjunto de dados provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e os seguintes padrões para a estrutura de covariância empírica dos dados: I, CS, AR, TOEP, TOEP (2), TOEP (3), BAND (3), CV, CSH, ARH, TOEPH, TOEPH (2), TOEPH (3), BANDH (3). Todos os valores correspondem a convergência iguais ou superiores a 99.9%, exceto quando discriminado nas tabelas.

No geral, os resultados indicam que o pressuposto escolhido com maior frequência pelos critérios de informação resultou da estrutura de covariância empírica dos conjuntos de dados analisados, particularmente para aqueles conjuntos com tamanho amostral maiores. Além disso, a frequência com que os modelos de covariância foram escolhidos aumentou a medida que o número de medidas repetidas e o tamanho amostral aumentaram.

Para simulações com 4 medidas repetidas, o modelo de covariância CV foi escolhido em 54% dos casos quando a estrutura de covariância empírica dos dados era de independência e tamanho amostral 4. Essa porcentagem foi 78 e 84% para os conjuntos de dados com tamanhos amostral 8 e 12, respectivamente. Enquanto para simulações com 8 medidas repetidas, essas proporções foram 56, 79 e 86%, respectivamente.

Para simulações com 4 medidas repetidas, o modelo de covariância SC foi escolhido em 40% dos casos quando a estrutura de covariância empírica dos dados também era de simetria composta e tamanho amostral 4. Essa porcentagem foi 44 e 35% para os conjuntos de dados com tamanhos amostral 8 e 12, respectivamente.

Enquanto para simulações com 8 medidas repetidas, essas proporções foram 42, 54 e 40%, respectivamente.

Para simulações com 4 medidas repetidas, o modelo de covariância SCH foi escolhido em 34% dos casos quando a estrutura de covariância empírica dos dados também era de simetria composta com variâncias heterogêneas e tamanho amostral 4. Essa porcentagem foi 75 e 89% para os conjuntos de dados com tamanhos amostral 8 e 12, respectivamente. Enquanto para simulações com 8 medidas repetidas, essas proporções foram 45, 85 e 92%, respectivamente.

Para simulações com 4 medidas repetidas, o modelo de covariância AR foi escolhido em 41% dos casos quando a estrutura de covariância empírica dos dados também era autorregressiva e tamanho amostral 4. Essa porcentagem foi 74 e 86% para os conjuntos de dados com tamanhos amostral 8 e 12, respectivamente. Enquanto para simulações com 8 medidas repetidas, essas proporções foram 64, 95 e 92%, respectivamente.

Para simulações com 4 medidas repetidas, o modelo de covariância ARH foi escolhido em 22% dos casos quando a estrutura de covariância empírica dos dados também era autorregressiva com variâncias heterogêneas e tamanho amostral 4. Essa porcentagem foi 55 e 75% para os conjuntos de dados com tamanhos amostral 8 e 12, respectivamente. Enquanto para simulações com 8 medidas repetidas, essas proporções foram 19, 40 e 60%, respectivamente.

Para conjuntos de dados com versões do padrão TOEP para a estrutura de covariâncias empírica, o modelo AR representou com frequência uma parte considerável da escolha pelo critério de informação BIC, sendo muitas vezes o modelo mais escolhido, particularmente para simulações com maior número de medidas repetidas e tamanho amostral. Além disso, a frequência das escolhas foi mais distribuída entre os outros modelos, muitas vezes sem um modelo predominar sobre outro na escolha pelo critério.

Para conjuntos de dados com versões do padrão BAND (3) e BANDH (3) para a estrutura de covariâncias empírica, o modelo TOEP (3) e TOEPH (3) representaram a maior parte das escolhas pelo critério de informação BIC, e aumentaram com o aumento do número de medidas repetidas e do tamanho amostral.

4.2 Estudo sobre erro do tipo I em modelos lineares mistos aplicados a experimentos envolvendo medidas repetidas

As Tabelas 7 a 20 (Apêndice B) e as Tabelas 21 a 34 (Apêndice C) apresentam, para um nível de significância de 1% e 5% respectivamente, os valores empíricos para as taxas de rejeição de H_0 dos testes de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados provenientes de experimentos simulados sob H_0 com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e os seguintes padrões para a estrutura de covariância empírica dos dados: I, CS, AR, TOEP, TOEP (2), TOEP (3), BAND (3), CV, CSH, ARH, TOEPH, TOEPH (2), TOEPH (3), BANDH (3). Todos os valores correspondem a convergência iguais ou superiores a 99.9%, exceto quando discriminado nas tabelas.

Os resultados das taxas de rejeição da hipótese nula indicam que o uso de modelos de covariância que não reconheçam correlações heterogêneas entre as medidas repetidas pode (1) inflar o erro do tipo I ou (2) reduzi-lo a níveis muito conservadores, podendo afetar a conclusão dos experimentos agrícolas. As taxas de rejeição da hipótese nula para a análise dos conjuntos de dados sem correlação entre as medidas repetidas ficaram próximas a taxa nominal para todos os pressupostos sobre o padrão da estrutura de covariância entre medidas repetidas, e não variou com o aumento do tamanho amostral, nem com o aumento do número de medidas repetidas para ambos os níveis de significância (Tabelas 7, 8, 21 e 22). No entanto, a partir da presença de correlação não nula, os pressupostos sobre o padrão da estrutura de covariância dos dados afetam as taxas de rejeição de H_0 seja devido a 1 ou 2.

Como esperado, quando houve correlação não desprezível entre medidas repetidas nos conjuntos de dados simulados, padrões de covariância que sub-modelam a estrutura de covariância empírica dos dados apresentaram maior tendência para inflar a taxa de rejeição da hipótese nula a níveis mais liberais que aqueles estabelecidos pelo nível de significância. Para um nível de significância de 1%, o viés em relação a taxa nominal para erro do tipo 1 foi 6α , dependendo do pressuposto sobre o padrão da estrutura de covariância empírica entre as medidas repetidas. Para um nível de significância de 5%, esse viés foi a 2α . Além disso, o

modelo de covariância CV reduziu a taxa de rejeição de H_0 para praticamente zero, exceto quando o padrão empírico dos dados também possuía correlações nulas para todos os pares de medidas repetidas.

O uso de modelos lineares mistos com pressuposto de simetria composta para o padrão da estrutura de covariância entre medidas repetidas elevou a taxa de erro do tipo I para além de 6 e 10% quando a matriz de covariância empírica dos dados foi mais complexa (correlações heterogêneas), para os níveis de significância de 1 e 5%, respectivamente. Além disso, modelos lineares mistos com o pressuposto de componentes de variância (correlações nulas) reduziu a taxa de rejeição para praticamente zero, exceto quando a matriz de covariância dos dados também possuía correlações nulas entre as medidas repetidas. Além disso, o número de medidas repetidas e o tamanho amostral não influenciaram a taxa de rejeição da hipótese nula quando falsa (erro do tipo I).

Para aqueles conjuntos de dados com padrão de covariância empírico de simetria composta (Tabela 3), a aplicação de pressupostos que não modelem correlações entre medidas repetidas ou que considerem nulas algumas das correlações apresentou valores extremamente conservadores para a taxa de erro do tipo I. Os pressupostos de simetria composta, autorregressivo e não estruturado apresentaram taxas de erro do tipo I próximas a taxa nominal de 5%, apesar de que para o menor tamanho amostral as versões com variâncias heterogêneas apresentaram taxas um pouco abaixo do que a taxa nominal, embora superior comparada com aqueles pressupostos de correlação nula. Apesar dos pressupostos de simetria composta, autorregressivo e não estruturado apresentarem taxas de erro do tipo I compatíveis com aquelas esperadas pelo pesquisador, o pressuposto de simetria composta apresentou poder estatístico superior.

A aplicação de modelos lineares mistos com pressuposto de covariância com padrão de componentes de variância apresentou valores extremamente conservadores para a taxa de erro do tipo I, reduzida para praticamente zero para todos os cenários, exceto quando o padrão de covariância original dos conjuntos de dados também foi CV ou TOEP (2). Esses padrões possuem um número maior de correlações nulas que os demais padrões avaliados.

Para aqueles conjuntos de dados com padrão de covariância empírico de simetria composta, alguns dos padrões Toeplitz apresentaram valores mais conservadores para a taxa de rejeição para a hipótese nula. O padrão Toeplitz (3) reduziu a taxa de rejeição para 1.9% (Tabela 2).

Com exceção dos conjuntos de dados com correlação nula, a utilização de modelos misto com o pressuposto de simetria acarretou taxas de rejeição mais liberais para todos os padrões considerados, particularmente para alguns dos pressupostos com padrões Toeplitz.

Os resultados indicam que tanto variâncias heterogêneas quanto covariâncias heterogêneas afetam as taxas de erro de tipo I. Os resultados indicam que o uso de modelos mistos com modelo de covariância de simetria composta, que não modela correlações heterogêneas, aumenta a rejeição de H_0 em favor da hipótese alternativa (erro do tipo I).

4.3 Estudo sobre poder estatístico em modelos lineares mistos aplicados a experimentos envolvendo medidas repetidas

As Tabelas 35 a 48 (Apêndice D) e as Tabelas 49 a 62 (Apêndice E) apresentam, para um nível de significância de 5% e 1% respectivamente, os valores empíricos para o poder estatístico para os testes de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados provenientes de experimentos simulados sob H_1 com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e os seguintes padrões para a estrutura de covariância empírica dos dados: I, CS, AR, TOEP, TOEP (2), TOEP (3), BAND (3), CV, CSH, ARH, TOEPH, TOEPH (2), TOEPH (3), BANDH (3).

Para conjuntos de dados com padrão SC, SCH, AR, ARH, TOEP, TOEPH, TOEP (3), TOEPH (3), BAND (3) e BANDH (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, o uso de modelos lineares mistos aliados a modelos de covariância mais simples que o padrão SC como CV ou mais complexos como AR, TOEP, TOEP (3), TOEPH (3), BAND (3) e BANDH(3) reduz o poder estatístico do teste de hipótese da interação, quando o tamanho amostral não for grande o

suficiente, para ambos os níveis de significância avaliados (Tabela 44). A magnitude da redução foi superior para aqueles modelos de covariância com variâncias heterogêneas. Esse efeito foi mais atenuado para aqueles conjuntos de dados com padrão de covariância empírica com uma maior presença de correlações nulas como aqueles conjuntos de dados gerados a partir de um padrão CV, TOEP (2) e TOEPH (2).

O modelo de covariância que correspondeu ao padrão da estrutura de covariância empírica dos dados obteve um poder estatístico de 83% para o menor tamanho amostral enquanto o modelo TOEP, TOEP (2) e TOEP (3) o poder estatístico foi 50, 30 e 22% respectivamente. O poder estatístico para as versões dos modelos citados anteriormente com variâncias heterogêneas foi 36, 18 e 12%, respectivamente. A medida que o tamanho amostral aumentou, a diferenças entre os poderes para cada modelo de covariância tendem a igualdade.

Violação dos pressupostos na ANOVA univariada e multivariada resultaram em viés de amostragem e taxas inflacionadas do erro tipo I, resultando em estimativas com pouca robustez. e, conseqüentemente, afetando a significância dos tratamentos e os resultados dos experimentos. Como as observações dentro dos grupos não contribuem com informações completamente independentes, o tamanho amostral efetivo é menor que o número total de observações de todos os grupos, e por isso aumentam a probabilidade de rejeição da hipótese nula, afetando a qualidade do estimador.

O poder estatístico e a taxa de erro do tipo I dos modelos lineares mistos com base em padrões de covariâncias residuais foram investigados por Gueorguieva e Krystal (2004) que concluíram que também concluíram que um controle de erro do tipo I ideal resulta da estrutura de covariância especificada que corresponde à estrutura de covariância empírica (dados observados).

O poder estatístico e a taxa de erro do tipo I dos modelos lineares mistos com base em covariâncias *AR* e em covariâncias *UN* foram investigados por Gueorguieva e Krystal (2004). Os resultados revelaram uma menor taxa de erro do tipo I para *AR*. No entanto, os dados simulados já possuíam uma estrutura autorregressiva. Isso indica que um controle de erro do tipo I ideal resulta da estrutura de covariância especificada que corresponde à estrutura de covariância empírica. Em contraste,

Kowalchuk et al. (2004) mostrou que *UN* obtiveram um desempenho semelhante ao ajuste da estrutura de covariância verdadeira e, sob certas condições, apresentou melhor controle de erro Tipo I.

Goedert et al. (2013) conduziram uma simulação com um conjunto de dados com violação do pressuposto de esfericidade e encontrou poder estatístico superior de MLM-UN quando comparado com ANOVA para medidas repetidas, particularmente para pequenas amostras. O autor recomenda o uso de modelos lineares mistos com modelo de covariância *UN* baseado em estatística *F* ao invés de ANOVA para medidas repetidas. Gueorguieva e Krystal (2004) também encontraram taxas de erro do tipo I semelhantes para MLM-UN e ANOVA para medidas repetidas com correção de Greenhouse-Geisser em um estudo de simulação com quatro pontos de tempo. No entanto, as taxas de erro Tipo I foram ligeiramente mais corretas para MLM com base na simetria composta (MLM-SC). Harverkamp e Beauducel (2017) avaliaram a taxa de erro do tipo I em experimentos com medidas repetidas simulados, e mostraram que elas não foram afetadas pelo tamanho amostral. Os autores avaliaram a taxa de erro do tipo I para as seguintes situações: ANOVA para medidas repetidas sem correção nos testes *F*, ANOVA com correção, MLM-CS, e MLM-UN. Todas as situações foram avaliadas sob a condição de violação e não violação do pressuposto de esfericidade e para tamanhos amostrais de $n = 20, 40, 80$ e 100 , como também para os seguintes pontos de tempo $m = 3, 6$ e 9 . As simulações foram baseadas em populações com e sem violação da suposição de esfericidade. Os resultados mostraram quando o pressuposto de esfericidade foi violado e o tamanho amostral foi pequeno, o método de ANOVA para medidas repetidas com correção dos testes *F* foi superior. Os resultados mostraram um viés progressivo para ANOVA (medidas repetidas) e MLM-CS no caso de violação do pressuposto de simetria composta. O viés aumentou com o número de pontos de tempo, embora o viés já fosse suficientemente grande já para 3 pontos de tempo. Os autores relataram que o efeito foi observado independentemente do tamanho amostral nem do número de pontos no tempo. Foi também observado um aumento na taxa de erro do tipo I para MLM-UN com 9 pontos de tempo com tamanho amostral menores ou iguais a 60. Esse efeito foi observado tanto nos dados que satisfizeram o pressuposto de esfericidade como naqueles que violaram. Os autores recomendam cuidado ao utilizar MLM-UN devido ao viés progressivo. Além disso, os pesquisadores relataram viés no método ANOVA mesmo

com correções nos testes F, particularmente para situações com mais pontos de observação no tempo. Contudo, o estudo foi limitado a análise do erro do tipo I intraclass e os modelos não continham nenhum efeito entre grupos, como tratamentos de interesse. Por isso, os resultados dos estudos de simulação sobre a especificação mais adequada para a obtenção de um melhor controle do erro do tipo I ainda não são conclusivos, carecendo mais estudos com diferentes cenários de modelagens.

Os padrões de correlação estruturados refletem suposições especiais sobre as correlações entre as medidas repetidas, no caso de que eles tendem a diminuir com o passar do tempo ou espaço. As suposições sobre a estrutura de covariância real dos dados introduzem o risco de escolher um padrão muito simples, o que poderia inflar falsamente a taxa de erro tipo I, ou muito complexo o que poderia acarretar a perda do poder estatístico. Apesar dos estudos com modelos lineares mistos, os resultados ainda não são conclusivos sobre o modelo mais adequado para os diferentes cenários experimentais, e sobre a consequência não se considerar a estrutura que proporciona o melhor ajuste na análise dos dados. Muitos dos estudos disponíveis na literatura são específicos a poucos cenários fora do contexto agrícola, dificultando a aplicação mais adequada de modelos lineares mistos por pesquisadores não estatísticos, já que a aplicação de modelos mistos requer a especificação de parâmetros além daqueles padrões dos programas estatísticos.

5 CONCLUSÕES

Na análise de experimentos que envolvem medidas repetidas, é fundamental que pressupostos estejam adequados quanto a estrutura de covariância dos dados para que o modelo tenha níveis adequados de erro e poder estatístico. Os resultados desse trabalho reforçam a necessidade do ajuste correto dos modelos mistos e o cuidado com a utilização dos ajustes padrões dos modelos oferecidos pelos programas estatísticos. Em muitos pacotes estatísticos capazes de lidar com modelos lineares mistos, o modelo padrão para a matriz de covariância é componentes de variância, exigindo do pesquisador maiores conhecimento sobre a modelagem utilizando modelos lineares mistos. Ainda, modelos de covariância intermediários como o padrão AR fornecem um maior controle do erro do tipo I enquanto mantêm níveis adequados de poder estatístico, e devem ser incluídos entre os modelos candidatos avaliados pelo pesquisador.

REFERÊNCIAS

- ALLEGUE, H., ARAYA-AJOY, Y. G., DINGEMANSE, N. J., DOCHTERMANN, N. A., GARAMSZEGI, L. Z., NAKAGAWA, S., WESTNEAT, D. F. (2017). Statistical quantification of individual differences (SQuID): An educational and statistical tool for understanding multilevel phenotypic data in linear mixed models. **Methods in Ecology and Evolution**, 8, 257–267.
- BELL, A., FAIRBROTHER, M. & JONES, K. Fixed and random effects models: making an informed choice. **Qual Quant** 53, 1051–1074 (2019).
- BLANCA, M., ALARCÓN, R., ARNAU, J. ET AL. Effect of variance ratio on ANOVA robustness: Might 1.5 be the limit?. **Behavior Research** 50, 937–962 (2018).
- BAKDASH, J.Z.; MARUSICH, L.R. Repeated Measures Correlation. **Frontiers in Psychology** v. 8, n. 456., 2017.
- CASELLA, G.; R. BERGER. 2002. **Statistical Inference**, 2 ed. Pacific Grove, CA. Duxbury.
- CONDORELLI, G. E.; MACCAFERRI, M., NEWCOMB, M., ANDRADE-SANCHEZ PEDRO, WHITE, J. W.; FRENCH, A. N., SCIARA, G., WARD, R., TUBEROSA, R. Comparative aerial and ground based high throughput phenotyping for the genetic dissection of NDV as a proxy for drought adaptive traits in durum wheat. **Frontiers in Plant Science**. v. 9, n. 893, 2018.
- DEMIDENKO, Eugene. **Mixed Models: Theory and Applications with R**. 2. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 768 p, 2013.
- DIXON, P. Models of accuracy in repeated-measures designs. **Journal of Memory and Language**, v. 59, n. 4, p. 447-456, 2008.
- DUARTE, J. B.; VENCOSKY, R. Estimacão e predição por modelo linear misto com ênfase na ordenação de médias de tratamentos genéticos. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 1, p. 109-117, 2001.
- GBUR, E. E.; STROUP, W. W.; MCCARTER, K. S.; DURHAM, S.; YOUNG, L. J.; CHRISTMAN, M.; WEST, M.; KRAMER, M. **Analysis of Generalized Linear Mixed Models in the Agricultural and Natural Resources Sciences**. Madison, Wi, EUA: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Crop Science Society of America, Inc. 283 p., 2012.
- GUEORGUIEVA, R., e KRYSTAL, J. H. Move Over ANOVA Progress in Analyzing Repeated-Measures Data and Its Reflection in Papers Published in the Archives of General Psychiatry. **Archives of General Psychiatry**, 61(3), 310–317, 2004.
- GUERIN, L., AND W.W. STROUP. 2000. A simulation study to evaluate proc mixed analysis of repeated measures data. **Proceedings of the 12th Annual Conference on Applied Statistics in Agriculture**, Manhattan, KS. 30 Apr.–2 May 2000, Kansas State University, Manhattan, KS.

HAVERKAMP, N., BEAUDUCCEL, A. Violation of the Sphericity Assumption and Its Effect on Type-I Error Rates in Repeated Measures NOVA and Multi-Level Linear Models (MLM). **Frontiers in Psychology**. 8. 2017

HENDERSON, O. KEMPTHORNE, S.R. SEARLE, C.N. VON KROSIG, Estimation of environmental and genetic trends from records subject to culling, *Biometrics* 15 (1959) 192–218.

KENWARD, M. G.; ROGER, J. H. Small sample inference for fixed effects from restricted maximum likelihood. **Biometrics**, v. 53, p. 983-997, 1997.

KESELMAN, H. J.; ALGINA, J.; WILCOX, R. R.; KOWALCHUK, R. K. Testing repeated measures hypothesis when covariance matrices are heterogeneous: Revisiting the robustness of the Welch-James test again. **Educational and Psychological Measurement**, v. 60, p. 925-938, 2000.

KOWALCHUCK, R. K.; KESELMAN, H. J.; ALGINA, J.; WOLFINGER, R. D. The analysis of repeated measurements with mixed model adjusted F tests.

Educational and Psychological Measurement, v. 64, p. 224-242, 2004.

LI, Z.. A Review on Mixed Models. **Journal of Biometric and Biostatistics** 8: 350, 2017.

LITTELL, R.C.; MILLIKEN, G.A.; STROUP, W.W.; WOLFINGER, R.D. **SAS System for Mixed Models**. SAS Institute Inc., Cary, 1996.

LITTELL, R. C., PENDERGAST, J. P., NATARAJAN, R. **Modelling covariance structure in the analysis of repeated measures data**. Statistics in Medicine, 2000.

MARCIN, S., WIESŁAW, M., ADRIANA, D.; KINGA N., ELŻBIETA, W. Four-way data analysis within the linear mixed modelling framework. **Scientia Agrícola**. Piracicaba, v. 72, n. 5, p. 411-419, 2015 .

MCCULLAGH, P; NELDER, J. A. **Generalized Linear Models**, 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1989.

OBERFELD, D., FRANKE, T. Evaluating the robustness of repeated measures analyses: The case of small sample sizes and nonnormal data. **Behavior Research Methods**, v. 45, p. 792–812, 2013.

PATTERSON, H.D; THOMPSON, R. Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. **Biometrika**, v. 58. p. 545–554, 1971.

PIEPHO, H.P., BÜCHSE, A.; RICHTER, C. A mixed modelling approach for randomized experiments with repeated measures. **Journal Agronomy and Crop Sciences**, v.190, n. 4, p. 230–247, 2004.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2015.

SAS INSTITUTE INC. **SAS/STAT® 14.1 User's Guide**. Cary, NC: SAS Institute Inc., 2015.

ROSSUM, G.; DRAKE F. L. **Python 3 Reference Manual**. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009.

SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. **Biometry: the principles and practice of statistics in biological research**. 3. ed. New York: W. H. Freeman, 880 p., 1995.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H.; DICKY, D. A. **Principles, and procedures of statistics: a biometrical approach**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1997. 672 p.

STROUP, W.W. **Generalized Linear Mixed Models**. Boca Raton, FL. CRC Press, 2013.

VASEY, M. W.; THAYER, J. F. The continuing problem of false positives in repeated measures ANOVA in psychophysiology: A Multivariate Solution. **Psychophysiology**, v. 24, n. 4, p. 479–486, 1987.

ZHANG, X.; GUAN, Z.; WANG, L. Combined GWAS and QTL analysis for dissecting the genetic architecture of kernel test weight in maize. **Molecular Genetics and Genomics**, v. 295, p. 409–420, 2020.

YANG, R.; JUSKIW, P. Analysis of covariance in agronomy and crop research. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 91, n. 4, p. 621-641, 2011.

WANG, W. Identifiability of linear mixed effects models. **Electronic Journal of Statistics**, v.7, p. 244-263, 2013.

APÊNDICE A – Seleção de modelos

Tabela 1 – Porcentagem de modelos de covariância escolhidos pelo critério de seleção BIC de um total de 10,000 análises com modelos lineares mistos a partir de dados provenientes de experimentos simulados envolvendo 4 medidas repetidas, tamanho amostral 4 e os seguintes padrões de covariância entre as medidas repetidas: identidade – I, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), Band 3 – BAND3, além das versões com variâncias heterogêneas

Modelo simulado	Modelo ajustado											
	CV	SC	SCH	AR	ARH	T	TH	T (2)	TH (2)	T (3)	TH (3)	UN
	----- % -----											
I	53,99	7,47	3,11	4,11	1,59	5,23	1,62	1,72	2,41	6,60	2,22	9,93
CV	39,98	4,69	9,58	2,77	5,64	2,53	4,27	1,36	7,49	4,18	4,45	13,06
SC	1,34	50,01	7,23	11,58	2,75	7,61	3,75	0,49	0,33	2,52	0,89	11,50
SCH	0,93	15,13	33,93	7,71	8,65	1,73	9,75	0,38	0,70	1,47	2,15	17,47
AR	1,18	12,41	2,23	40,88	5,55	4,46	1,83	6,05	2,71	9,91	3,00	9,79
ARH	0,86	5,08	7,91	21,20	21,87	1,42	4,00	3,46	6,44	5,16	8,21	14,39
TOEP	0,37	6,21	1,62	42,62	5,44	4,44	1,85	4,25	2,01	15,29	5,92	9,98
TOEPH	0,25	2,66	4,90	20,59	23,78	1,79	3,95	2,53	4,76	5,86	14,18	14,75
TOEP (2)	5,65	4,07	0,83	18,96	2,90	8,43	2,11	16,16	7,47	19,18	3,62	10,62
TOEPH (2)	0,23	0,44	0,52	17,88	10,51	2,68	1,94	22,96	18,16	15,93	4,87	3,88
TOEP (3)	0,09	0,98	0,52	5,54	1,86	10,14	3,40	0,30	0,04	52,15	12,18	12,80
TOEPH (3)	0,09	0,52	0,89	4,24	3,76	3,49	9,21	0,16	0,20	14,76	41,54	21,14
BAND (3)	0,69	1,57	0,68	2,96	1,13	9,80	2,96	0,14	0,06	53,32	14,39	12,30
BANDH (3)	0,89	1,22	1,68	2,59	2,30	1,65	8,55	0,13	0,08	11,32	50,71	18,88

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

T = TOEP; TH = TOEPH; T2 = TOEP (2); T3 = TOEP (3); UN = sem estrutura.

Tabela 2 – Porcentagem de modelos de covariância escolhidos pelo critério de seleção BIC de um total de 10,000 análises com modelos lineares mistos a partir de dados provenientes de experimentos simulados envolvendo 4 medidas repetidas, tamanho amostral 8 e os seguintes padrões de covariância entre as medidas repetidas: identidade – I, componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), Band 3 – (BAND3), além das versões com variâncias heterogêneas

Modelo simulado	Modelo ajustado											
	CV	SC	SCH	AR	ARH	T	TH	T (2)	TH (2)	T (3)	TH (3)	UN
	----- % -----											
I	78,32	6,17	1,10	3,57	0,61	2,53	0,13	1,31	0,68	4,76	0,38	0,44
CV	44,16	2,69	19,49	1,97	11,10	0,84	1,70	0,63	10,69	2,37	3,08	1,28
SC	0,02	81,40	3,95	7,58	0,74	4,83	0,45	0,05	0,00	0,42	0,01	0,55
SCH	0,02	7,11	75,09	2,92	6,58	0,22	5,43	0,01	0,05	0,20	0,28	2,09
AR	0,02	8,27	0,64	73,65	3,42	2,23	0,31	2,65	0,40	7,31	0,73	0,37
ARH	0,00	1,64	6,78	20,27	54,79	0,32	1,77	0,93	2,76	1,70	7,31	1,73
TOEP	0,00	1,99	0,12	70,94	3,15	3,24	0,27	1,22	0,16	16,89	1,61	0,41
TOEPH	0,00	0,41	1,74	16,85	53,78	0,56	2,36	0,32	1,28	3,18	17,17	2,35
TOEP (2)	0,48	1,09	0,09	29,2	2,02	7,69	0,38	31,67	2,88	22,64	1,22	0,64
TOEPH (2)	0,23	0,44	0,52	17,88	10,51	2,68	1,94	22,96	18,16	15,93	4,87	3,88
TOEP (3)	0,00	0,05	0,02	1,19	0,25	9,96	1,20	0,00	0,00	81,66	4,48	1,19
TOEPH (3)	0,00	0,00	0,00	0,73	0,93	1,68	9,02	0,00	0,00	8,22	73,64	5,78
BAND (3)	0,00	0,08	0,02	0,16	0,06	9,09	1,21	0,00	0,00	84,04	4,36	0,98
BANDH (3)	0,02	0,03	0,12	0,17	0,44	0,44	8,99	0,00	0,00	3,92	82,03	3,84

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

T = TOEP; TH = TOEPH; T2 = TOEP (2); T3 = TOEP (3); UN = sem estrutura.

Tabela 3 – Porcentagem de modelos de covariância escolhidos pelo critério de seleção BIC de um total de 10,000 análises com modelos lineares mistos a partir de dados provenientes de experimentos simulados envolvendo 4 medidas repetidas, tamanho amostral 12 e os seguintes padrões de covariância entre as medidas repetidas: identidade - I, componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz - TOEP, Toeplitz 2 - TOEP (2), Toeplitz 3 - TOEP (3), Band 3 - (B3), além das versões com variâncias heterogêneas

Modelo simulado	Modelo ajustado											
	CV	SC	SCH	AR	ARH	T	TH	T (2)	TH (2)	T (3)	TH (3)	UN
	----- % -----											
I	84,21	5,53	0,52	3,27	0,36	1,42	0,05	0,56	0,28	3,63	0,15	0,02
CV	35,11	1,38	26,75	1,09	14,87	0,24	1,42	0,29	14,23	1,26	2,85	0,51
SC	0,00	89,69	2,40	4,08	0,16	3,33	0,14	0,00	0,00	0,13	0,00	0,07
SCH	0,00	1,82	88,95	0,55	3,99	0,04	3,6	0,00	0,00	0,01	0,07	0,97
AR	0,00	4,09	0,20	85,58	2,07	1,63	0,04	0,89	0,07	5,11	0,22	0,10
ARH	0,00	0,36	4,43	10,97	74,87	0,12	1,57	0,12	0,93	0,55	5,39	0,69
TOEP	0,00	0,56	0,03	78,54	1,79	4,17	0,15	0,13	0,02	13,69	0,80	0,12
TOEPH	0,00	0,01	0,55	7,78	69,86	0,29	2,83	0,02	0,17	0,93	16,7	0,86
TOEP (2)	0,03	0,22	0,01	30,66	1,30	6,71	0,12	37,21	1,72	20,81	0,90	0,31
TOEPH (2)	0,01	0,08	0,20	13,40	14,37	2,13	1,63	23,37	22,30	12,04	6,58	3,89
TOEP (3)	0,00	0,00	0,00	0,10	0,01	9,02	0,48	0,00	0,00	87,56	2,47	0,36
TOEPH (3)	0,00	0,00	0,00	0,1	0,18	0,45	8,36	0,00	0,00	1,71	85,17	4,03
BAND (3)	0,00	0,03	0,01	0,03	0,01	7,93	0,42	0,00	0,00	88,81	2,55	0,21
BANDH (3)	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,08	7,94	0,00	0,00	0,56	89,85	1,55

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

T = TOEP; TH = TOEPH; T2 = TOEP (2); T3 = TOEP (3); UN = sem estrutura.

Tabela 4 – Porcentagem de modelos de covariância escolhidos pelo critério de seleção BIC de um total de 10,000 análises com modelos lineares mistos a partir de dados provenientes de experimentos simulados envolvendo 8 medidas repetidas, tamanho amostral 4 e os seguintes padrões de covariância entre as medidas repetidas: identidade - I , componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz - TOEP, Toeplitz 2 - TOEP (2), Toeplitz 3 - TOEP (3), Band 3 - (B3), além das versões com variâncias heterogêneas

Modelo simulado	Modelo ajustado											
	CV	SC	SCH	AR	ARH	T	TH	T (2)	TH (2)	T (3)	TH (3)	UN
	----- % -----											
I	56,5	10,2	1,74	4,84	0,95	7,65	4,08 ^b	1,42	1,32 ^a	6,95	1,10 ^a	nc
CV	42,92	7,53	7,82	3,91	4,54	4,69	8,54 ^b	1,33	5,21 ^a	5,78	4,21 ^a	nc
SC	0,17	74,78	4,73	1,72	0,39	10,80	6,44 ^b	0,06	0,00 ^a	0,36	0,14 ^a	nc
SCH	0,10	26,59	44,93	3,00	1,43	5,01	17,95 ^b	0,04	0,08 ^a	0,18	0,16 ^a	nc
AR	0,00	2,05	0,20	63,66	3,98	9,77	6,60 ^b	1,93	0,41 ^a	6,71	2,38 ^a	nc
ARH	0,02	1,20	1,12	44,48	19,14	5,11	12,30 ^b	1,83	1,21 ^a	5,33	5,99 ^a	nc
TOEP	0,01	5,62	0,56	62,37	5,08	13,41	8,60 ^b	0,26	0,11 ^a	1,75	0,83 ^a	nc
TOEPH	0,03	3,08	2,84	42,77	21,43	7,53	16,63 ^b	0,23	0,27 ^a	1,58	2,07 ^a	nc
TOEP (2)	0,49	0,80	0,13	16,86	1,18	18,96	6,68 ^b	12,16	1,65 ^a	31,09	7,22 ^a	nc
TOEPH (2)	0,56	0,64	0,39	13,33	4,06	12,17	12,70 ^b	9,43	5,11 ^a	23,15	15,08 ^a	nc
TOEP (3)	0,09	0,92	0,04	31,71	1,97	23,32	9,72 ^b	0,46	0,23 ^a	23,86	5,20 ^a	nc
TOEPH (3)	0,06	0,57	0,25	25,28	6,02	16,13	16,05 ^b	0,49	0,37 ^a	22,10	9,88 ^a	nc
BAND (3)	0,05	0,48	0,10	3,84	0,39	15,07	7,38 ^b	0,03	0,00 ^a	59,20	10,88 ^a	nc
BANDH (3)	0,06	0,36	0,21	2,90	1,25	10,42	10,70 ^b	0,03	0,05 ^a	51,47	19,98 ^a	nc

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

T = TOEP; TH = TOEPH; T2 = TOEP (2); T3 = TOEP (3); UN = sem estrutura.

Tabela 5 – Porcentagem de modelos de covariância escolhidos pelo critério de seleção BIC de um total de 10,000 análises com modelos lineares mistos a partir de dados provenientes de experimentos simulados envolvendo 8 medidas repetidas, tamanho amostral 8 e os seguintes padrões de covariância entre as medidas repetidas: identidade - I , componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz - TOEP, Toeplitz 2 - TOEP (2), Toeplitz 3 - TOEP (3), Band 3 - (B3), além das versões com variâncias heterogêneas

Modelo simulado	Modelo ajustado											
	CV	SC	SCH	AR	ARH	T	TH	T (2)	TH (2)	T (3)	TH (3)	UN
	----- % -----											
I	79,30	7,80	0,27	4,30	0,13	0,86	0,02 ^b	1,19	0,22 ^a	5,83	0,08 ^a	0,00
CV	54,06	4,81	14,56	3,17	7,47	0,36	0,88 ^b	0,71	7,02 ^a	4,08	2,79 ^a	0,09
SC	0,00	97,21	0,99	0,09	0,00	1,59	0,11 ^b	0,00	0,00 ^a	0,00	0,00 ^a	0,01
SCH	0,00	11,29	85,03	0,29	0,09	0,42	2,76 ^b	0,00	0,00 ^a	0,00	0,00 ^a	0,12
AR	0,00	0,21	0,00	94,51	0,85	1,59	0,13 ^b	0,11	0,00 ^a	2,55	0,05 ^a	0,00
ARH	0,00	0,05	0,08	53,95	40,0	0,35	1,54 ^b	0,12	0,11 ^a	2,00	1,73 ^a	0,07
TOEP	0,00	1,21	0,05	89,08	1,15	8,02	0,38 ^b	0,00	0,00 ^a	0,09	0,01 ^a	0,01
TOEPH	0,00	0,39	0,62	48,01	42,66	2,10	5,81 ^b	0,00	0,00 ^a	0,16	0,05 ^a	0,2
TOEP (2)	0,00	0,03	0,00	12,79	0,18	13,68	0,44 ^b	7,47	0,06 ^a	63,21	2,09 ^a	0,05
TOEPH (2)	0,00	0,06	0,02	9,93	3,73	6,60	5,59 ^b	5,05	2,49 ^a	40,00	26,21 ^a	0,32
TOEP (3)	0,00	0,01	0,00	35,27	0,54	27,81	1,16 ^b	0,01	0,00 ^a	34,53	0,58 ^a	0,09
TOEPH (3)	0,00	0,01	0,01	27,54	7,72	14,79	10,68 ^b	0,00	0,01 ^a	31,72	6,88 ^a	0,64
BAND (3)	0,00	0,02	0,00	0,51	0,01	5,23	0,32 ^b	0,00	0,00 ^a	92,50	1,38 ^a	0,03
BANDH (3)	0,00	0,00	0,01	0,33	0,13	3,17	2,65 ^b	0,00	0,00 ^a	74,26	19,30 ^a	0,15

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

T = TOEP; TH = TOEPH; T2 = TOEP (2); T3 = TOEP (3); UN = sem estrutura.

Tabela 6 – Porcentagem de modelos de covariância escolhidos pelo critério de seleção BIC de um total de 10,000 análises com modelos lineares mistos a partir de dados provenientes de experimentos simulados envolvendo 8 medidas repetidas, tamanho amostral 12 e os seguintes padrões de covariância entre as medidas repetidas: identidade - I, componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz - TOEP, Toeplitz 2 - TOEP (2), Toeplitz 3 - TOEP (3), Band 3 - (B3), além das versões com variâncias heterogêneas

Modelo simulado	Modelo ajustado											
	CV	SC	SCH	AR	ARH	T	TH	T (2)	TH (2)	T (3)	TH (3)	UN
	----- % -----											
I	84,84	6,52	0,04	3,19	0,04	0,3	0,03	0,71	0,07	4,26	0,00	0,00
CV	44,1	2,65	22,24	1,94	12,29	0,07	0,29	0,6	11,01	2,12	2,69	0,00
SC	0,00	99,02	0,37	0,00	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SCH	0,00	2,14	96,93	0,00	0,00	0,02	0,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AR	0,00	0,01	0,00	98,39	0,23	0,5	0,00	0,00	0,00	0,87	0,00	0,00
ARH	0,00	0,00	0,01	36,25	61,8	0,1	0,65	0,00	0,00	0,42	0,77	0,00
TOEP	0,00	0,24	0,00	91,89	0,45	7,33	0,07	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
TOEPH	0,00	0,04	0,13	31,07	61,69	1,33	5,7	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01
TOEP (2)	0,00	0,00	0,00	5,59	0,03	12,61	0,15	2,04	0,02	78,34	1,22	0,00
TOEPH (2)	0,00	0,00	0,00	2,95	2,55	4,97	5,65	1,46	1,19	36,46	44,76	0,01
TOEP (3)	0,00	0,00	0,00	28,09	0,2	40,88	0,38	0,00	0,00	30,12	0,33	0,00
TOEPH (3)	0,00	0,00	0,00	18,26	9,89	19,4	17,59	0,00	0,00	27,11	7,74	0,01
BAND (3)	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	3,78	0,06	0,00	0,00	95,86	0,27	0,00
BANDH (3)	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	1,5	1,8	0,00	0,00	70,45	26,15	0,02

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

T = TOEP; TH = TOEPH; T2 = TOEP (2); T3 = TOEP (3); UN = sem estrutura.

APÊNDICE B – Erro do tipo I ($\alpha = 0,01$)

Tabela 7 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão identidade, com $\alpha = 0,01$

Modelos ajustado	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0086	0,0092	0,0081
	8	0,0100	0,0110	0,0107
SC	4	0,0086	0,0105	0,0084
	8	0,0095	0,0101	0,0097
SCH	4	0,0066	0,0105	0,0083
	8	0,0060	0,0100	0,0110
AR	4	0,0089	0,0097	0,0082
	8	0,0096	0,0106	0,0107
ARH	4	0,0070	0,0089	0,0082
	8	0,0061	0,0106	0,0114
TOEP	4	0,0146	0,0111	0,0099
	8	0,0294 ^a	0,0135	0,0111
TOEPH	4	0,0070	0,0088	0,0091
	8	0,0047 ^b	0,0103	0,0115
TOEP (2)	4	0,0109	0,0101	0,0080
	8	0,0110	0,0106	0,0106
TOEPH (2)	4	0,0090	0,0090	0,0079
	8	0,0073 ^a	0,0101	0,0117
TOEP (3)	4	0,0118	0,0107	0,0090
	8	0,0108	0,0109	0,0118
TOEPH (3)	4	0,0098	0,0086	0,008
	8	0,0070 ^a	0,0093	0,0114
UN	4	0,0092	0,0113	0,0097
	8	nc	0,0099	0,0109

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 8 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão CV para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0176	0,0176	0,0167
	8	0,0173	0,0159	0,0182
SC	4	0,0164	0,0163	0,0178
	8	0,0164	0,0157	0,0186
SCH	4	0,0085	0,0118	0,0106
	8	0,0077	0,0107	0,0112
AR	4	0,0166	0,0152	0,0176
	8	0,0168	0,0164	0,0177
ARH	4	0,0079	0,0111	0,0107
	8	0,0073	0,0097	0,0109
TOEP	4	0,0181	0,0158	0,0178
	8	0,0305	0,0153	0,0176
TOEPH	4	0,0078	0,0103	0,0107
	8	0,0060	0,0094	0,0107
TOEP (2)	4	0,0188	0,0161	0,0173
	8	0,0183	0,0165	0,0175
TOEPH (2)	4	0,0100	0,0118	0,0106
	8	0,0082	0,0095	0,0111
TOEP (3)	4	0,0168	0,0166	0,0184
	8	0,0198	0,0165	0,0183
TOEPH (3)	4	0,0085	0,0116	0,0110
	8	0,0092	0,0089	0,0105
UN	4	0,0100	0,0095	0,0128
	8	nc	0,0093	0,0090

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 9 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão SC para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0000	0,0000	0,0000
	8	0,0000	0,0000	0,0000
SC	4	0,0092	0,0079	0,0106
	8	0,0105	0,0102	0,0120
SCH	4	0,0039	0,0071	0,0089
	8	0,0015	0,0063	0,0094
AR	4	0,0081	0,0110	0,0139
	8	0,0096	0,0109	0,0130
ARH	4	0,0074	0,0112	0,0148
	8	0,0045	0,0112	0,0143
TOEP	4	0,0152	0,0094	0,0118
	8	0,0363	0,0149	0,0121
TOEPH	4	0,0075	0,0082	0,0097
	8	0,0061 ^b	0,0094	0,0102
TOEP (2)	4	0,0079	0,0042	0,0047
	8	0,0053	0,0021	0,0020
TOEPH (2)	4	0,0054	0,0043	0,0047
	8	0,0100 ^a	0,0027	0,0024
TOEP (3)	4	0,0087	0,0033	0,0040
	8	0,0065	0,003	0,0027
TOEPH (3)	4	0,0060	0,0050	0,0063
	8	0,0098 ^a	0,0045	0,0039
um	4	0,0117	0,0104	0,0105
	8	nc	0,0097	0,0111

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 10 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão SCH para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0009	0,0000	0,0000
	8	0,0005	0,0000	0,0001
SC	4	0,0158	0,0160	0,0149
	8	0,0226	0,0213	0,0236
SCH	4	0,0070	0,0084	0,0073
	8	0,0061	0,0054	0,0077
AR	4	0,0104	0,0116	0,0124
	8	0,0123	0,0172	0,0193
ARH	4	0,0090	0,0124	0,0114
	8	0,0067	0,0142	0,0123
TOEP	4	0,0150	0,0126	0,0117
	8	0,0306	0,0138	0,0166
TOEPH	4	0,0077	0,0089	0,0072
	8	0,0083	0,0068	0,0085
TOEP (2)	4	0,0103	0,0061	0,0046
	8	0,0067	0,0033	0,0026
TOEPH (2)	4	0,0079	0,0061	0,0035
	8	0,0117	0,0031	0,0015
TOEP (3)	4	0,0093	0,0049	0,0038
	8	0,0093	0,0047	0,0043
TOEPH (3)	4	0,0074	0,0067	0,0037
	8	0,0093	0,0040	0,0032
UN	4	0,0105	0,0108	0,0073
	8	nc	0,0092	0,0088

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 11 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão AR para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0005	0,0006	0,0004
	8	0,0048	0,0029	0,0031
SC	4	0,0175	0,0191	0,0181
	8	0,0403	0,0415	0,0393
SCH	4	0,0091	0,0139	0,0162
	8	0,0141	0,0285	0,0321
AR	4	0,0054	0,0084	0,0085
	8	0,0046	0,0074	0,0088
ARH	4	0,0047	0,0092	0,0088
	8	0,0033	0,0084	0,0088
TOEP	4	0,0134	0,0111	0,0093
	8	0,0310	0,0112	0,0105
TOEPH	4	0,0070	0,0100	0,0086
	8	0,0073 ^b	0,0118	0,0090
TOEP (2)	4	0,0087	0,0048	0,0038
	8	0,0095	0,0058	0,003
TOEPH (2)	4	0,0121	0,0055	0,0036
	8	0,0225 ^a	0,0079	0,0046
TOEP (3)	4	0,0086	0,0063	0,0038
	8	0,0092	0,0071	0,0051
TOEPH (3)	4	0,0094	0,0077	0,0054
	8	0,0176 ^a	0,0095	0,0056
UN	4	0,0091	0,0091	0,0083
	8	nc	0,0101	0,0109

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 12 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão ARH para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0024	0,0008	0,0012
	8	0,0089	0,0076	0,0046
SC	4	0,0260	0,0260	0,0256
	8	0,0458	0,0475	0,0448
SCH	4	0,0101	0,0108	0,0116
	8	0,0153	0,0208	0,0201
AR	4	0,0100	0,0119	0,0139
	8	0,0101	0,0134	0,0133
ARH	4	0,0052	0,0091	0,0084
	8	0,0062	0,0094	0,0079
TOEP	4	0,0168	0,0117	0,0131
	8	0,0284	0,0145	0,0127
TOEPH	4	0,0087	0,0085	0,0091
	8	0,0096	0,0118	0,0095
TOEP (2)	4	0,0118	0,0079	0,0062
	8	0,0139	0,0075	0,0060
TOEPH (2)	4	0,0107	0,0077	0,0052
	8	0,0232	0,0082	0,0060
TOEP (3)	4	0,0118	0,0073	0,0063
	8	0,0146	0,0088	0,0083
TOEPH (3)	4	0,0100	0,0078	0,0073
	8	0,0204	0,0075	0,0065
UN	4	0,0118	0,0093	0,0097
	8	nc	0,0108	0,0101

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 13 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEP para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0006	0,0004	0,0003
	8	0,0034	0,0011	0,0014
SC	4	0,0233	0,0231	0,0247
	8	0,0420	0,0415	0,0434
SCH	4	0,0104	0,0163	0,0198
	8	0,013	0,0271	0,0330
AR	4	0,0058	0,0095	0,0094
	8	0,0058	0,0073	0,0102
ARH	4	0,0050	0,0100	0,0103
	8	0,0041	0,0078	0,0107
TOEP	4	0,0167	0,0118	0,0115
	8	0,0286	0,0109	0,0124
TOEPH	4	0,0077	0,0094	0,0093
	8	0,0050	0,0094	0,0097
TOEP (2)	4	0,0099	0,0061	0,0039
	8	0,0068	0,0036	0,0033
TOEPH (2)	4	0,0098	0,0067	0,0035
	8	0,0190	0,005	0,0039
TOEP (3)	4	0,0093	0,0063	0,0044
	8	0,0096	0,0048	0,0046
TOEPH (3)	4	0,0101	0,0079	0,0064
	8	0,0153	0,0058	0,0051
UN	4	0,0115	0,0099	0,0111
	8	nc	0,0080	0,0097

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 14 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEPH para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0022	0,0008	0,0016
	8	0,0066	0,0037	0,0030
SC	4	0,0289	0,0304	0,0329
	8	0,0522	0,0504	0,0481
SCH	4	0,0099	0,0122	0,0124
	8	0,0138	0,0166	0,016
AR	4	0,0100	0,0125	0,0156
	8	0,0124	0,0148	0,0164
ARH	4	0,0070	0,0080	0,0105
	8	0,0069	0,0084	0,0100
TOEP	4	0,0180	0,0132	0,0146
	8	0,0294	0,0147	0,0155
TOEPH	4	0,0082	0,0088	0,0093
	8	0,0070	0,0108	0,0087
TOEP (2)	4	0,0133	0,0072	0,0080
	8	0,0114	0,0068	0,0057
TOEPH (2)	4	0,0133	0,0066	0,0056
	8	0,0205	0,0076	0,0049
TOEP (3)	4	0,0117	0,0078	0,0084
	8	0,0132	0,0069	0,0067
TOEPH (3)	4	0,0107	0,0081	0,0072
	8	0,0171	0,0067	0,0049
UN	4	0,0090	0,0104	0,0092
	8	nc	0,0113	0,0106

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 15 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEP (2) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0064	0,0065	0,0043
	8	0,0118	0,0144	0,0125
SC	4	0,0213	0,0212	0,0219
	8	0,0265	0,0295	0,0258
SCH	4	0,0111	0,0168	0,0189
	8	0,0122	0,0220	0,0231
AR	4	0,0090	0,0124	0,0123
	8	0,0115	0,0162	0,0156
ARH	4	0,0067	0,0104	0,0122
	8	0,0076	0,0136	0,0123
TOEP	4	0,0164	0,0128	0,0102
	8	0,0369	0,0129	0,0100
TOEPH	4	0,0085	0,0099	0,0094
	8	0,0066	0,0126	0,0098
TOEP (2)	4	0,0132	0,0120	0,0092
	8	0,0175	0,0172	0,0139
TOEPH (2)	4	0,0170	0,0109	0,0098
	8	0,0240	0,0165	0,0129
TOEP (3)	4	0,0146	0,0126	0,011
	8	0,0167	0,0168	0,0147
TOEPH (3)	4	0,0116	0,0107	0,0102
	8	0,0179	0,0128	0,0123
UN	4	0,0118	0,0097	0,0101
	8	nc	0,0097	0,0107

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 16 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEPH (2) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0201	0,0083	0,0064
	8	0,0217	0,0188	0,0183
SC	4	0,0298	0,0250	0,0233
	8	0,0337	0,0341	0,0333
SCH	4	0,0109	0,0183	0,0164
	8	0,0147	0,0211	0,0227
AR	4	0,0146	0,0154	0,0156
	8	0,0201	0,0228	0,0222
ARH	4	0,0070	0,0129	0,0135
	8	0,0082	0,014	0,0161
TOEP	4	0,0234	0,0133	0,0111
	8	0,0342	0,0186	0,0161
TOEPH	4	0,0055	0,0106	0,0104
	8	0,0076	0,0142	0,0132
TOEP (2)	4	0,0213	0,0118	0,0106
	8	0,0249	0,0212	0,0184
TOEPH (2)	4	0,0205	0,0111	0,0102
	8	0,0242	0,0163	0,0166
TOEP (3)	4	0,0199	0,0148	0,0123
	8	0,0245	0,0253	0,0209
TOEPH (3)	4	0,0103	0,0111	0,0116
	8	0,0165	0,0149	0,0146
UN	4	0,0100	0,0098	0,0097
	8	nc	0,0103	0,0112

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 17 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEP (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0025	0,0016	0,0009
	8	0,0146	0,0134	0,0011
SC	4	0,0342	0,0360	0,0298
	8	0,0438	0,0406	0,0364
SCH	4	0,0167	0,0259	0,0276
	8	0,0187	0,0327	0,0282
AR	4	0,0132	0,0176	0,0204
	8	0,0144	0,0161	0,0220
ARH	4	0,0106	0,0184	0,0209
	8	0,0089	0,0168	0,0227
TOEP	4	0,0105	0,0108	0,0055
	8	0,0319	0,0117	0,0097
TOEPH	4	0,0056	0,0096	0,0078
	8	0,0074	0,0133	0,0090
TOEP (2)	4	0,0142	0,0110	0,0990
	8	0,0199	0,0153	0,0120
TOEPH (2)	4	0,0078	0,0088	0,0054
	8	0,0236	0,0162	0,0092
TOEP (3)	4	0,0100	0,0099	0,0075
	8	0,0134	0,0106	0,0081
TOEPH (3)	4	0,0121	0,0121	0,0088
	8	0,0223	0,0127	0,0096
UN	4	0,0097	0,0111	0,0091
	8	nc	0,0114	0,0092

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 18 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEPH (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0049	0,0034	0,0021
	8	0,0181	0,0155	0,0168
SC	4	0,0350	0,0387	0,0322
	8	0,0469	0,048	0,0494
SCH	4	0,0124	0,0183	0,0167
	8	0,0181	0,0278	0,0325
AR	4	0,0144	0,0219	0,0200
	8	0,0206	0,0207	0,0224
ARH	4	0,0104	0,0163	0,0146
	8	0,0092	0,0166	0,0164
TOEP	4	0,0117	0,0116	0,0109
	8	0,0249	0,0138	0,0147
TOEPH	4	0,0052	0,0090	0,0085
	8	0,0093	0,0116	0,0118
TOEP (2)	4	0,0152	0,0145	0,0109
	8	0,0250	0,0199	0,0176
TOEPH (2)	4	0,0091	0,0094	0,0090
	8	0,0262	0,0178	0,0141
TOEP (3)	4	0,0121	0,0107	0,0087
	8	0,0171	0,0133	0,0133
TOEPH (3)	4	0,0133	0,0098	0,0098
	8	0,0199	0,013	0,0117
UN	4	0,0092	0,0088	0,0072
	8	nc	0,0109	0,0081

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 19 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão BAND (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0033	0,0024	0,0018
	8	0,0126	0,0127	0,0104
SC	4	0,0254	0,0269	0,0266
	8	0,0380	0,0372	0,0345
SCH	4	0,0132	0,0203	0,0218
	8	0,0177	0,0304	0,0311
AR	4	0,0202	0,0244	0,0256
	8	0,0207	0,0274	0,0253
ARH	4	0,0141	0,0217	0,0246
	8	0,0140	0,0264	0,0246
TOEP	4	0,0116	0,0109	0,0111
	8	0,0291	0,0132	0,0116
TOEPH	4	0,0059	0,0092	0,0106
	8	0,0063	0,0129	0,0118
TOEP (2)	4	0,0161	0,0135	0,0114
	8	0,0178	0,0178	0,0155
TOEPH (2)	4	0,0103	0,0114	0,0102
	8	0,0168	0,0173	0,0137
TOEP (3)	4	0,0113	0,0108	0,0102
	8	0,0111	0,0105	0,0098
TOEPH (3)	4	0,0137	0,0118	0,0113
	8	0,0335	0,0137	0,0125
UN	4	0,0108	0,0109	0,0107
	8	nc	0,0083	0,0113

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 20 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão BANDH (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0041	0,003	0,0027
	8	0,0168	0,0162	0,0143
SC	4	0,0258	0,0269	0,0296
	8	0,0444	0,0457	0,0407
SCH	4	0,0113	0,0139	0,0158
	8	0,0158	0,0257	0,0273
AR	4	0,0195	0,0225	0,0253
	8	0,0321	0,0348	0,0323
ARH	4	0,0132	0,0193	0,0224
	8	0,0153	0,0253	0,0261
TOEP	4	0,0141	0,0122	0,0161
	8	0,0270	0,0147	0,0143
TOEPH	4	0,0078	0,0082	0,0106
	8	0,0089	0,0122	0,0130
TOEP (2)	4	0,0175	0,0123	0,0133
	8	0,0277	0,0230	0,0190
TOEPH (2)	4	0,0128	0,0099	0,0098
	8	0,0198	0,0170	0,0157
TOEP (3)	4	0,0135	0,0115	0,0146
	8	0,0154	0,0150	0,0136
TOEPH (3)	4	0,0162	0,0118	0,0113
	8	0,0338	0,0135	0,0129
UN	4	0,0112	0,0088	0,0117
	8	nc	0,0096	0,0103

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

APÊNDICE C – Erro do tipo I ($\alpha = 0,05$)

Tabela 21 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão identidade, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0477	0,0513	0,0467
	8	0,0497	0,0518	0,0504
SC	4	0,0487	0,0503	0,0457
	8	0,0496	0,0519	0,0511
SCH	4	0,0409 ^a	0,0487	0,0463
	8	0,0435	0,0472	0,0502
AR	4	0,0449	0,0533	0,4680
	8	0,0490	0,0516	0,0511
ARH	4	0,0421	0,0501	0,0464
	8	0,0420	0,0479	0,0511
TOEP	4	0,0538 ^a	0,0554	0,0496
	8	0,0816 ^b	0,0549	0,0551
TOEPH	4	0,0395	0,0497	0,0460
	8	0,0179 ^c	0,0466	0,0512
TOEP (2)	4	0,0473	0,0531	0,0467
	8	0,0502	0,0512	0,0512
TOEPH (2)	4	0,0421	0,0491	0,0468
	8	0,0416 ^b	0,0479	0,0495
TOEP (3)	4	0,0522	0,0551	0,0489
	8	0,0517	0,0535	0,0537
TOEPH (3)	4	0,0415	0,0507	0,0475
	8	0,0413 ^b	0,0472	0,0491
UN	4	0,0485	0,0516	0,0473
	8	nc	0,0488	0,0524

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 22 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão CV para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0658	0,0578	0,0610
	8	0,0676	0,0609	0,0642
SC	4	0,0617	0,0556	0,0598
	8	0,0665	0,0620	0,0645
SCH	4	0,0457 ^a	0,0501	0,0510
	8	0,0436	0,0467	0,0515
AR	4	0,0595	0,0583	0,0602
	8	0,0686	0,0621	0,0662
ARH	4	0,0471	0,0504	0,0509
	8	0,0426	0,0474	0,0508
TOEP	4	0,0641	0,0587	0,0621
	8	0,0828	0,0615	0,0647
TOEPH	4	0,0416	0,0504	0,0522
	8	0,0219	0,0457	0,0520
TOEP (2)	4	0,0639	0,0580	0,0607
	8	0,0699	0,0628	0,0666
TOEPH (2)	4	0,0477	0,0491	0,0510
	8	0,0430	0,0471	0,0513
TOEP (3)	4	0,0654	0,0593	0,0639
	8	0,0734	0,0651	0,0685
TOEPH (3)	4	0,0461	0,0490	0,0509
	8	0,0408	0,0458	0,0513
UN	4	0,0532	0,0504	0,0519
	8	nc	0,0502	0,0496

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 23 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão SC para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0004	0,0000	0,0000
	8	0,0002	0,0002	0,0000
SC	4	0,0496	0,0499	0,0533
	8	0,0514	0,0490	0,0544
SCH	4	0,0299	0,0403	0,0467
	8	0,0190	0,0393	0,0464
AR	4	0,0362	0,0454	0,0511
	8	0,0357	0,0422	0,0518
ARH	4	0,0384	0,0502	0,0513
	8	0,0349	0,0458	0,0525
TOEP	4	0,0563	0,0476	0,0534
	8	0,0898	0,0526	0,0537
TOEPH	4	0,0360	0,0411	0,0482
	8	0,0271 ^c	0,0526	0,0460
TOEP (2)	4	0,0265	0,0174	0,0186
	8	0,0146	0,0077	0,0074
TOEPH (2)	4	0,0274	0,0198	0,0196
	8	0,0283 ^b	0,0106	0,0089
TOEP (3)	4	0,0325	0,0192	0,0194
	8	0,0275	0,0141	0,0132
TOEPH (3)	4	0,0287	0,0263	0,0276
	8	0,0311 ^b	0,0163	0,0162
UN	4	0,0508	0,0503	0,0522
	8	nc	0,0518	0,0508

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 24 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão SCH para o padrão da estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0039	0,0012	0,0002
	8	0,0030	0,0004	0,0002
SC	4	0,0598	0,0601	0,0575
	8	0,0697	0,0722	0,0735
SCH	4	0,0387	0,0447	0,0427
	8	0,0285	0,0400	0,0459
AR	4	0,0382	0,0475	0,0457
	8	0,0449	0,0533	0,0549
ARH	4	0,0424	0,0513	0,0486
	8	0,0340	0,0495	0,0493
TOEP	4	0,0578	0,0544	0,0515
	8	0,0792	0,0619	0,061
TOEPH	4	0,0394 ^a	0,0445	0,0443
	8	0,0287	0,0422	0,0489
TOEP (2)	4	0,0318	0,0231	0,0201
	8	0,0191	0,0135	0,0114
TOEPH (2)	4	0,0325 ^a	0,0243	0,0189
	8	0,0307	0,0122	0,0096
TOEP (3)	4	0,0346	0,0234	0,0200
	8	0,0292	0,0228	0,0179
TOEPH (3)	4	0,0374 ^a	0,0312	0,0281
	8	0,0327	0,0194	0,0156
UN	4	0,0524	0,0510	0,0467
	8	nc	0,0495	0,0494

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 25 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e AR para o padrão da estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0038	0,0032	0,0019
	8	0,0163	0,0121	0,0111
SC	4	0,0641	0,0644	0,0645
	8	0,0971	0,0976	0,093
SCH	4	0,0395	0,0534	0,0543
	8	0,0562	0,0803	0,0811
AR	4	0,0323	0,0398	0,0433
	8	0,0361	0,0414	0,0439
ARH	4	0,0316	0,0422	0,0460
	8	0,0331	0,0455	0,0472
TOEP	4	0,0557	0,0476	0,0493
	8	0,0822	0,0522	0,0478
TOEPH	4	0,0364	0,0446	0,0464
	8	0,0233 ^c	0,0492	0,0467
TOEP (2)	4	0,0334	0,0224	0,0198
	8	0,0331	0,0221	0,0196
TOEPH (2)	4	0,0413	0,0262	0,0211
	8	0,0511 ^b	0,0283	0,0212
TOEP (3)	4	0,0358	0,0282	0,0277
	8	0,0396	0,031	0,0268
TOEPH (3)	4	0,0390	0,0353	0,0327
	8	0,0512 ^b	0,0351	0,0305
um	4	0,0487	0,0496	0,0478
	8	nc	0,0501	0,0494

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 26 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão ARH para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0108	0,0054	0,0065
	8	0,0247	0,0197	0,0164
SC	4	0,0743	0,0733	0,0759
	8	0,1022	0,103	0,0983
SCH	4	0,0389	0,0423	0,0465
	8	0,0529	0,0602	0,0599
AR	4	0,0413	0,0486	0,0530
	8	0,0453	0,0576	0,0562
ARH	4	0,0384	0,0445	0,0480
	8	0,0335	0,0484	0,0474
TOEP	4	0,0562	0,0528	0,0551
	8	0,0746	0,0597	0,0577
TOEPH	4	0,0372 ^a	0,0465	0,0500
	8	0,0287	0,0493	0,0467
TOEP (2)	4	0,0381	0,0308	0,0296
	8	0,0410	0,0318	0,0274
TOEPH (2)	4	0,0419	0,0324	0,0294
	8	0,0583	0,0338	0,0265
TOEP (3)	4	0,0418	0,0353	0,0350
	8	0,0487	0,0399	0,0364
TOEPH (3)	4	0,0444 ^a	0,0373	0,0379
	8	0,0560	0,0345	0,0322
UN	4	0,0490	0,0503	0,0525
	8	nc	0,0518	0,0457

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 27 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEP para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0050	0,0027	0,0019
	8	0,0091	0,0049	0,0048
SC	4	0,0781	0,0711	0,0723
	8	0,0975	0,0931	0,0918
SCH	4	0,0434	0,0569	0,0627
	8	0,0467	0,074	0,0749
AR	4	0,0353	0,0400	0,0451
	8	0,0296	0,0425	0,0475
ARH	4	0,0339	0,0447	0,0484
	8	0,0274	0,0423	0,0511
TOEP	4	0,0568 ^a	0,0497	0,0509
	8	0,0802	0,0557	0,0524
TOEPH	4	0,0363	0,0427	0,0470
	8	0,0219 ^c	0,0470	0,0463
TOEP (2)	4	0,0340	0,0238	0,0206
	8	0,0234	0,0147	0,0137
TOEPH (2)	4	0,0377	0,0271	0,0224
	8	0,0430 ^b	0,0193	0,0141
TOEP (3)	4	0,0353	0,0260	0,0258
	8	0,0316	0,0223	0,0227
TOEPH (3)	4	0,0427 ^a	0,0365	0,0342
	8	0,0449 ^b	0,0248	0,0232
UN	4	0,0496	0,0510	0,0496
	8	nc	0,0507	0,0498

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 28 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEPH para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0106	0,0066	0,0053
	8	0,0176	0,0128	0,0093
SC	4	0,0832	0,0823	0,0802
	8	0,1084	0,1072	0,0999
SCH	4	0,0429	0,0458	0,0463
	8	0,0428	0,0483	0,0461
AR	4	0,0436	0,0563	0,0604
	8	0,0463	0,0555	0,0572
ARH	4	0,0356	0,0458	0,0479
	8	0,0348	0,0482	0,0486
TOEP	4	0,0605	0,0566	0,0593
	8	0,0796	0,0633	0,0571
TOEPH	4	0,0398 ^a	0,0445	0,0488
	8	0,0283	0,0508	0,0469
TOEP (2)	4	0,0404	0,0316	0,0312
	8	0,0351	0,0244	0,0208
TOEPH (2)	4	0,0476 ^a	0,0295	0,0294
	8	0,0510	0,0258	0,0204
TOEP (3)	4	0,0398	0,0385	0,0372
	8	0,0425	0,0349	0,0300
TOEPH (3)	4	0,0490 ^a	0,0408	0,0415
	8	0,0470	0,0301	0,0255
UN	4	0,0503	0,0501	0,0513
	8	nc	0,0541	0,0478

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 29 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEP (2) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0303	0,0270	0,0243
	8	0,0456	0,0485	0,0428
SC	4	0,0701	0,0720	0,0658
	8	0,0815	0,0832	0,0765
SCH	4	0,0532	0,0635	0,0645
	8	0,0545	0,0752	0,0742
AR	4	0,0481	0,0560	0,0584
	8	0,0579	0,0650	0,0600
ARH	4	0,0443	0,0569	0,0600
	8	0,0407	0,0628	0,0583
TOEP	4	0,0623 ^a	0,0564	0,0506
	8	0,0892	0,0546	0,0486
TOEPH	4	0,0436	0,0488	0,0484
	8	0,02116	0,0529	0,0499
TOEP (2)	4	0,0529	0,0485	0,0456
	8	0,0638	0,0577	0,0516
TOEPH (2)	4	0,0609	0,0510	0,0454
	8	0,0689	0,0613	0,0558
TOEP (3)	4	0,0586	0,0571	0,0540
	8	0,0687	0,0645	0,0589
TOEPH (3)	4	0,0488	0,0525	0,0527
	8	0,0525	0,0564	0,0545
UN	4	0,0506	0,0508	0,0487
	8	nc	0,0475	0,0520

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 30 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEPH (2) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0344	0,0308	0,0261
	8	0,0584	0,0531	0,0516
SC	4	0,0762	0,0723	0,0693
	8	0,0921	0,0843	0,0866
SCH	4	0,0524 ^a	0,0609	0,0594
	8	0,0546	0,0671	0,0676
AR	4	0,0532	0,0594	0,0592
	8	0,0695	0,0721	0,0733
ARH	4	0,0431	0,0582	0,0581
	8	0,0443	0,0584	0,0594
TOEP	4	0,0660 ^a	0,0548	0,0532
	8	0,0901	0,0639	0,0573
TOEPH	4	0,0419	0,0485	0,0462
	8	0,0241	0,0537	0,0528
TOEP (2)	4	0,0547	0,0499	0,0485
	8	0,0744	0,0677	0,0632
TOEPH (2)	4	0,0588	0,0506	0,0472
	8	0,0723	0,061	0,0561
TOEP (3)	4	0,0627	0,0563	0,0564
	8	0,0776	0,0776	0,0706
TOEPH (3)	4	0,0472	0,0520	0,0509
	8	0,052	0,0609	0,0601
UN	4	0,0533	0,0483	0,0506
	8	0,2815	0,0482	0,0538

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 31 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEP (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0135	0,0095	0,0085
	8	0,0427	0,0368	0,0409
SC	4	0,0913	0,0865	0,0858
	8	0,1060	0,0942	0,1048
SCH	4	0,0562	0,0697	0,0693
	8	0,0684	0,0816	0,0946
AR	4	0,0525	0,0642	0,0696
	8	0,0559	0,0612	0,0674
ARH	4	0,0481	0,0650	0,0717
	8	0,0453	0,0614	0,0647
TOEP	4	0,0501 ^a	0,0479	0,0531
	8	0,0795	0,0501	0,0531
TOEPH	4	0,0310 ^a	0,0433	0,0494
	8	0,0288	0,0500	0,0525
TOEP (2)	4	0,0485	0,0390	0,0422
	8	0,0581	0,0511	0,0555
TOEPH (2)	4	0,0380	0,0315	0,0327
	8	0,0670	0,052	0,0523
TOEP (3)	4	0,0451	0,0434	0,0460
	8	0,0534	0,0493	0,0516
TOEPH (3)	4	0,0517	0,0496	0,0519
	8	0,0609	0,052	0,0511
UN	4	0,0484	0,0515	0,0517
	8	nc	0,0540	0,0497

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 32 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEPH (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,018	0,0137	0,0116
	8	0,0474	0,0443	0,0466
SC	4	0,0901	0,0929	0,0821
	8	0,1057	0,1064	0,1101
SCH	4	0,0450	0,0571	0,0532
	8	0,0590	0,0778	0,0808
AR	4	0,0538	0,0724	0,0667
	8	0,0633	0,0722	0,0734
ARH	4	0,0423	0,0645	0,0584
	8	0,0457	0,0633	0,0622
TOEP	4	0,0510 ^a	0,0552	0,0501
	8	0,0774	0,0543	0,0566
TOEPH	4	0,0339 ^a	0,0462	0,0471
	8	0,0276	0,0530	0,0500
TOEP (2)	4	0,0499	0,0502	0,0379
	8	0,0676	0,0614	0,0548
TOEPH (2)	4	0,0438 ^a	0,0405	0,0333
	8	0,0685	0,0597	0,0542
TOEP (3)	4	0,048	0,0498	0,0435
	8	0,0627	0,0568	0,0535
TOEPH (3)	4	0,0560 ^a	0,0521	0,0498
	8	0,06123	0,0579	0,0525
UN	4	0,0474	0,0480	0,0452
	8	nc	0,0507	0,0466

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 33 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão BAND (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,014	0,0116	0,0103
	8	0,0406	0,0365	0,0344
SC	4	0,0769	0,0777	0,0757
	8	0,0922	0,0912	0,0916
SCH	4	0,0500	0,0639	0,0667
	8	0,0608	0,0818	0,0823
AR	4	0,0638	0,0706	0,0738
	8	0,0743	0,0772	0,0753
ARH	4	0,0571	0,0685	0,074
	8	0,0563	0,0765	0,0739
TOEP	4	0,0535 ^a	0,0476	0,0498
	8	0,0772	0,0578	0,0533
TOEPH	4	0,0337	0,0452	0,0459
	8	0,0253	0,054	0,0531
TOEP (2)	4	0,0496	0,0423	0,042
	8	0,0639	0,0563	0,0484
TOEPH (2)	4	0,0432	0,0376	0,0403
	8	0,0540	0,056	0,0479
TOEP (3)	4	0,0524	0,0506	0,0527
	8	0,0496	0,0494	0,0485
TOEPH (3)	4	0,0571	0,0515	0,0522
	8	0,0786	0,0596	0,0526
UN	4	0,0524	0,0463	0,0505
	8	nc	0,0498	0,0513

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 34 – Valores empíricos para a taxa de rejeição de H_0 do teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3), além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão BANDH (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0213	0,0158	0,0138
	8	0,0492	0,0481	0,0429
SC	4	0,0796	0,0784	0,0812
	8	0,1057	0,1048	0,0971
SCH	4	0,0438	0,0520	0,0549
	8	0,0598	0,0765	0,0759
AR	4	0,0653	0,0682	0,0760
	8	0,0857	0,0887	0,0868
ARH	4	0,0543	0,0671	0,0713
	8	0,0615	0,0776	0,0788
TOEP	4	0,0557	0,0564	0,0615
	8	0,0759	0,0615	0,0611
TOEPH	4	0,0385 ^a	0,0453	0,0488
	8	0,0254	0,0566	0,0561
TOEP (2)	4	0,0554	0,0458	0,0481
	8	0,0751	0,0688	0,0611
TOEPH (2)	4	0,0459	0,0421	0,0418
	8	0,0587	0,0586	0,0608
TOEP (3)	4	0,0549	0,0543	0,0574
	8	0,0600	0,0601	0,0578
TOEPH (3)	4	0,0617 ^a	0,0511	0,0539
	8	0,0791	0,0600	0,0561
UN	4	0,0516	0,0476	0,0509
	8	nc	0,0487	0,0513

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

APÊNDICE D – Poder estatístico ($\alpha = 0,01$)

Tabela 35 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos mistos com os seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão I, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,1259	0,4020	0,6393
	8	0,1422	0,4569	0,7421
SC	4	0,1141	0,3839	0,6268
	8	0,1347	0,4467	0,7388
SCH	4	0,0748 ^a	0,3680	0,5924
	8	0,0700	0,3759	0,6861
AR	4	0,1000	0,3778	0,6239
	8	0,1300	0,4480	0,7347
ARH	4	0,0655	0,3293	0,5888
	8	0,0675	0,3706	0,6832
TOEP	4	0,1119 ^a	0,3665	0,6059
	8	0,1404	0,3761	0,6749
TOEPH	4	0,0531	0,2926	0,5531
	8	0,0148	0,2877	0,6158
TOEP (2)	4	0,1009	0,3772	0,6226
	8	0,1321	0,4489	0,7349
TOEPH (2)	4	0,0649	0,3260	0,5879
	8	0,0703	0,3696	0,6836
TOEP (3)	4	0,0983	0,3788	0,6291
	8	0,1126	0,4288	0,7224
TOEPH (3)	4	0,0520	0,3019	0,5672
	8	0,0491	0,3504	0,6699
UN	4	0,0486	0,2455	0,5067
	8	nc	0,1320	0,4416

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 36 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos com os seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão de CV para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,3089	0,7300	0,9264
	8	0,3087	0,7919	0,97
SC	4	0,2767	0,7152	0,9226
	8	0,2948	0,7846	0,9687
SCH	4	0,1947 ^a	0,7176	0,9384
	8	0,2507	0,8789	0,9928
AR	4	0,2481	0,7022	0,9181
	8	0,2826	0,7781	0,9680
ARH	4	0,1732	0,7120	0,9379
	8	0,2327	0,8723	0,9916
TOEP	4	0,2152	0,6743	0,9117
	8	0,2130	0,6744	0,9397
TOEPH	4	0,1059 ^a	0,6443	0,9158
	8	0,0427	0,7675	0,9805
TOEP (2)	4	0,2538	0,7000	0,9172
	8	0,2852	0,7782	0,9681
TOEPH (2)	4	0,1725 ^a	0,7087	0,9368
	8	0,2295	0,8726	0,9915
TOEP (3)	4	0,2371	0,6972	0,9199
	8	0,2499	0,7596	0,9647
TOEPH (3)	4	0,1193 ^a	0,6699	0,9304
	8	0,1727	0,8555	0,9905
UN	4	0,0909	0,5661	0,8871
	8	nc	0,4154	0,9072

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 37 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão de SC para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0558	0,2565	0,6236
	8	0,0497	0,2097	0,5890
SC	4	0,6705	0,9893	0,9999
	8	0,8070	0,9987	1,0000
SCH	4	0,4698	0,9809	0,9999
	8	0,5171	0,9954	1,0000
AR	4	0,1574	0,6899	0,9628
	8	0,0817	0,3275	0,6807
ARH	4	0,1261	0,6595	0,9535
	8	0,0491	0,2983	0,6372
TOEP	4	0,4556	0,9632	0,9995
	8	0,5082	0,9847	0,9999
TOEPH	4	0,2823	0,9471	0,9993
	8	0,1384	0,9658	0,9999
TOEP (2)	4	0,1104	0,4250	0,7825
	8	0,0573	0,2384	0,6051
TOEPH (2)	4	0,0600	0,3170	0,6724
	8	0,0356	0,1548	0,4643
TOEP (3)	4	0,1263	0,3536	0,7193
	8	0,0548	0,2423	0,6026
TOEPH (3)	4	0,0519	0,2146	0,5748
	8	0,0271	0,1580	0,4529
UN	4	0,1994	0,9234	0,9988
	8	nc	0,7320	0,9964

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 38 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão de SCH para a estrutura de covariância dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,2471	0,6115	0,9626
	8	0,2001	0,7115	0,9442
SC	4	0,8277	0,8978	1,0000
	8	0,2601	0,9978	1,0000
SCH	4	0,5933	0,9984	1,0000
	8	0,6938	0,9924	1,0000
AR	4	0,3995	0,9711	0,9984
	8	0,2129	0,9311	0,9735
ARH	4	0,3130	0,9712	0,9988
	8	0,2601	0,9312	0,9981
TOEP	4	0,5065	0,9997	0,9999
	8	0,4410	0,9797	0,9999
TOEPH	4	0,3633 ^a	0,9923	1,0000
	8	0,1869	0,9823	0,9999
TOEP (2)	4	0,3098	0,9043	0,9792
	8	0,1937	0,8033	0,9549
TOEPH (2)	4	0,1807 ^a	0,7689	0,9799
	8	0,1737	0,6689	0,9901
TOEP (3)	4	0,2212	0,6938	0,9627
	8	0,1565	0,5938	0,9548
TOEPH (3)	4	0,1174 ^a	0,7017	0,9776
	8	0,1220	0,6017	0,9910
UN	4	0,2454	0,9610	1,0000
	8	nc	0,8610	0,9991

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 39 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão AR para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0839	0,2914	0,5837
	8	0,1140	0,3283	0,5571
SC	4	0,4331	0,8414	0,9710
	8	0,3596	0,6969	0,8813
SCH	4	0,2741	0,7866	0,9563
	8	0,1937	0,6044	0,8318
AR	4	0,1731	0,6358	0,8971
	8	0,0887	0,3640	0,6400
ARH	4	0,1317	0,6095	0,8851
	8	0,0556	0,3285	0,6005
TOEP	4	0,1756	0,5981	0,8715
	8	0,1271	0,3371	0,5998
TOEPH	4	0,0974	0,5359	0,8412
	8	0,0194	0,2626	0,5358
TOEP (2)	4	0,1564	0,5128	0,8035
	8	0,1127	0,3560	0,6077
TOEPH (2)	4	0,0910	0,3898	0,7011
	8	0,0654	0,2656	0,5063
TOEP (3)	4	0,0798	0,3347	0,6632
	8	0,0804	0,3216	0,5905
TOEPH (3)	4	0,0450	0,2439	0,5594
	8	0,0435	0,2401	0,4943
UN	4	0,0705	0,4682	0,8096
	8	nc	0,1131	0,3634

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 40 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão ARH para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,2504	0,6794	0,9238
	8	0,2376	0,6156	0,8822
SC	4	0,6368	0,9629	0,9986
	8	0,5470	0,9028	0,9895
SCH	4	0,4283	0,9454	0,9975
	8	0,3875	0,9175	0,9952
AR	4	0,3763	0,8938	0,9911
	8	0,2009	0,6899	0,9420
ARH	4	0,2916	0,8881	0,9913
	8	0,2262	0,8658	0,9897
TOEP	4	0,2893	0,8474	0,9837
	8	0,1720	0,5811	0,9035
TOEPH	4	0,1720 ^a	0,8354	0,9859
	8	0,0484	0,7687	0,9827
TOEP (2)	4	0,3495	0,8289	0,9731
	8	0,2298	0,6658	0,9229
TOEPH (2)	4	0,2144 ^a	0,7875	0,9740
	8	0,1958	0,8011	0,9803
TOEP (3)	4	0,1914	0,6875	0,9366
	8	0,1721	0,6383	0,921
TOEPH (3)	4	0,1075 ^a	0,6685	0,9467
	8	0,1370	0,7916	0,9828
UN	4	0,1246	0,7545	0,9773
	8	nc	0,3896	0,8899

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 41 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEP para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,0855	0,2938	0,5735
	8	0,1050	0,3021	0,5476
SC	4	0,4792	0,8593	0,9733
	8	0,4561	0,8041	0,9446
SCH	4	0,3156	0,8039	0,9630
	8	0,2554	0,7150	0,9119
AR	4	0,2288	0,7138	0,9325
	8	0,1072	0,4173	0,7152
ARH	4	0,1789	0,6915	0,9267
	8	0,0633	0,3799	0,6887
TOEP	4	0,1743 ^a	0,5817	0,8665
	8	0,1340	0,3767	0,6766
TOEPH	4	0,0940	0,5182	0,8360
	8	0,0239	0,2951	0,6191
TOEP (2)	4	0,1986	0,5845	0,8549
	8	0,1083	0,3467	0,6134
TOEPH (2)	4	0,0924	0,4319	0,7460
	8	0,0570	0,2413	0,5063
TOEP (3)	4	0,0825	0,3683	0,6897
	8	0,0847	0,3333	0,6235
TOEPH (3)	4	0,0447 ^a	0,2591	0,5683
	8	0,0422	0,2254	0,5081
UN	4	0,0666	0,4528	0,8060
	8	nc	0,1340	0,4298

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 42 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 D TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEPH para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,2551	0,6826	0,9166
	8	0,2299	0,6413	0,8681
SC	4	0,6702	0,9670	0,9972
	8	0,6512	0,9132	0,9961
SCH	4	0,4444	0,9516	0,9969
	8	0,4729	0,9301	0,9983
AR	4	0,4427	0,9221	0,9939
	8	0,2430	0,9120	0,9687
ARH	4	0,3442	0,9196	0,9943
	8	0,2918	0,9045	0,9970
TOEP	4	0,3046 ^a	0,8505	0,9839
	8	0,1915	0,8254	0,9429
TOEPH	4	0,1697 ^a	0,8348	0,9862
	8	0,0628	0,8142	0,9919
TOEP (2)	4	0,4044	0,8580	0,9814
	8	0,2385	0,8123	0,9195
TOEPH (2)	4	0,2321 ^a	0,8196	0,9780
	8	0,1948	0,8023	0,9781
TOEP (3)	4	0,2113	0,7092	0,9465
	8	0,1943	0,6934	0,9297
TOEPH (3)	4	0,1188 ^a	0,7076	0,9573
	8	0,1496	0,6973	0,9851
UN	4	0,1265	0,7559	0,9762
	8	nc	0,7435	0,9310

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 43 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEP (2) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,1004	0,2923	0,4978
	8	0,1205	0,3175	0,5358
SC	4	0,1911	0,4698	0,6931
	8	0,1782	0,4194	0,6464
SCH	4	0,1235	0,4221	0,6638
	8	0,1008	0,3727	0,6270
AR	4	0,1018	0,3644	0,6072
	8	0,0701	0,2194	0,4352
ARH	4	0,0789	0,3627	0,6268
	8	0,0436	0,2213	0,4623
TOEP	4	0,1030 ^a	0,2746	0,4970
	8	0,1275	0,2683	0,4936
TOEPH	4	0,0538	0,2648	0,5172
	8	0,0135	0,2389	0,5065
TOEP (2)	4	0,1146	0,3686	0,6165
	8	0,0949	0,2679	0,4960
TOEPH (2)	4	0,0913	0,3493	0,6117
	8	0,0696	0,2559	0,5063
TOEP (3)	4	0,0845	0,2980	0,5405
	8	0,0644	0,1915	0,3984
TOEPH (3)	4	0,0552	0,2913	0,5564
	8	0,0387	0,2072	0,4644
UN	4	0,0416	0,2183	0,4712
	8	nc	0,1066	0,3549

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 44 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEPH (2) para o padrão de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,2450	0,5965	0,8408
	8	0,2339	0,5807	0,8453
SC	4	0,3663	0,7588	0,9312
	8	0,3156	0,6837	0,9061
SCH	4	0,2397	0,7246	0,9313
	8	0,2514	0,7805	0,9654
AR	4	0,2416	0,6802	0,9067
	8	0,1419	0,4658	0,7812
ARH	4	0,1762	0,6706	0,9125
	8	0,1374	0,6837	0,9402
TOEP	4	0,1922	0,5979	0,8606
	8	0,1918	0,4820	0,7995
TOEPH	4	0,0977	0,5613	0,8592
	8	0,0266	0,6629	0,9512
TOEP (2)	4	0,2688	0,7121	0,9182
	8	0,1860	0,5364	0,8328
TOEPH (2)	4	0,1767	0,6734	0,9165
	8	0,1790	0,7237	0,9532
TOEP (3)	4	0,1856	0,6233	0,8780
	8	0,1209	0,4303	0,7625
TOEPH (3)	4	0,1045	0,5949	0,8863
	8	0,0902	0,6657	0,9455
UN	4	0,0705	0,4708	0,8077
	8	nc	0,3482	0,8494

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 45 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEP (3) de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,1047	0,3028	0,5479
	8	0,1326	0,3074	0,5479
SC	4	0,3734	0,7251	0,8950
	8	0,2442	0,4916	0,8950
SCH	4	0,2287	0,6414	0,8562
	8	0,1356	0,4313	0,8562
AR	4	0,2116	0,5919	0,8245
	8	0,0842	0,2615	0,8245
ARH	4	0,1657	0,5591	0,8064
	8	0,0513	0,2585	0,8064
TOEP	4	0,0865	0,3298	0,5930
	8	0,1120	0,2531	0,5930
TOEPH	4	0,0378	0,2517	0,5181
	8	0,0185	0,2193	0,5181
TOEP (2)	4	0,1712	0,4501	0,6984
	8	0,1186	0,2984	0,6984
TOEPH (2)	4	0,0756	0,3039	0,5491
	8	0,0729	0,2549	0,5491
TOEP (3)	4	0,0869	0,3252	0,5890
	8	0,0735	0,2637	0,5890
TOEPH (3)	4	0,0452	0,2591	0,5268
	8	0,0480	0,2321	0,5268
UN	4	0,0407	0,2315	0,4898
	8	nc	0,1050	0,4898

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 46 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEPH (3) para o padrão de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,2560	0,6372	0,8850
	8	0,2322	0,6022	0,8734
SC	4	0,5782	0,9012	0,9851
	8	0,3865	0,8142	0,9657
SCH	4	0,3635	0,8629	0,9839
	8	0,2858	0,7613	0,9154
AR	4	0,4049	0,8345	0,9734
	8	0,1582	0,6365	0,9237
ARH	4	0,2992	0,8212	0,9725
	8	0,1627	0,7215	0,9543
TOEP	4	0,2025	0,6736	0,9145
	8	0,1687	0,5736	0,8945
TOEPH	4	0,0837	0,6309	0,9155
	8	0,0399	0,4329	0,8940
TOEP (2)	4	0,3426	0,7418	0,9297
	8	0,2110	0,6410	0,9001
TOEPH (2)	4	0,1766	0,6490	0,9017
	8	0,1945	0,6034	0,8845
TOEP (3)	4	0,1852	0,6128	0,8766
	8	0,1450	0,5428	0,8766
TOEPH (3)	4	0,1268	0,6692	0,9264
	8	0,1161	0,6034	0,8999
UN	4	0,0783	0,5176	0,8571
	8	nc	0,4554	0,8206

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 47 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão BAND (3) para o padrão de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,1036	0,3204	0,5730
	8	0,1341	0,2247	0,4640
SC	4	0,3216	0,6920	0,8839
	8	0,2384	0,5840	0,7719
SCH	4	0,2026	0,6136	0,8494
	8	0,1333	0,5256	0,7374
AR	4	0,1554	0,4460	0,6954
	8	0,1023	0,3370	0,5744
ARH	4	0,1150	0,4166	0,6770
	8	0,0579	0,4286	0,5340
TOEP	4	0,0913	0,3757	0,6527
	8	0,1118	0,2497	0,5477
TOEPH	4	0,0418	0,3014	0,5921
	8	0,0158	0,3484	0,4381
TOEP (2)	4	0,1325	0,3602	0,6033
	8	0,1215	0,2542	0,5303
TOEPH (2)	4	0,0721	0,2889	0,5338
	8	0,0688	0,2759	0,5658
TOEP (3)	4	0,1013	0,3892	0,6647
	8	0,0770	0,3572	0,5637
TOEPH (3)	4	0,0525	0,3132	0,6147
	8	0,0676	0,3132	0,5134
UN	4	0,0488	0,2820	0,5681
	8	nc	0,2523	0,4637

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 48 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão BANDH (3) para o padrão de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,01$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,2577	0,7416	0,8989
	8	0,2453	0,6806	0,7988
SC	4	0,5222	0,8605	0,9845
	8	0,3923	0,7912	0,8844
SCH	4	0,3409	0,8592	0,9850
	8	0,2901	0,8298	0,8849
AR	4	0,3087	0,7928	0,9350
	8	0,1845	0,6648	0,8349
ARH	4	0,2258	0,8094	0,9494
	8	0,1654	0,7778	0,8493
TOEP	4	0,2112	0,7970	0,9367
	8	0,1661	0,6790	0,8366
TOEPH	4	0,0952	0,8217	0,9590
	8	0,0329	0,7672	0,8589
TOEP (2)	4	0,2764	0,7450	0,8995
	8	0,2220	0,6794	0,7994
TOEPH (2)	4	0,1759	0,7581	0,9080
	8	0,1910	0,7769	0,8079
TOEP (3)	4	0,2103	0,7781	0,9178
	8	0,1661	0,7219	0,8177
TOEPH (3)	4	0,1485	0,8305	0,9632
	8	0,1363	0,7924	0,8631
UN	4	0,0995	0,7929	0,9350
	8	nc	0,5519	0,8349

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

APÊNDICE E – Poder estatístico ($\alpha = 0,05$)

Tabela 49 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos mistos com os seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão I, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,3258	0,6575	0,8408
	8	0,3336	0,7074	0,8947
SC	4	0,3056	0,6485	0,8358
	8	0,3296	0,6985	0,8929
SCH	4	0,2521 ^a	0,6155	0,8188
	8	0,2356 ^b	0,6409	0,8709
AR	4	0,2922	0,6425	0,8339
	8	0,3216	0,6965	0,8893
ARH	4	0,2443	0,6143	0,8196
	8	0,2280	0,6394	0,8682
TOEP	4	0,2915 ^a	0,6325	0,8262
	8	0,2983 ^b	0,6381	0,8636
TOEPH	4	0,1892	0,5782	0,7965
	8	0,0715 ^c	0,5661	0,8371
TOEP (2)	4	0,2942	0,6419	0,8338
	8	0,3240	0,6973	0,8894
TOEPH (2)	4	0,2377	0,6103	0,819
	8	0,2259 ^b	0,6397	0,8682
TOEP (3)	4	0,2951	0,6456	0,8397
	8	0,3009	0,6836	0,8827
TOEPH (3)	4	0,2003	0,5889	0,8064
	8	0,1920 ^b	0,6237	0,8647
UN	4	0,1815	0,5410	0,7766
	8	nc	0,3808	0,7404

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 50 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos com os seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão CV para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,5599	0,8953	0,9802
	8	0,5680	0,9379	0,9953
SC	4	0,5327	0,8901	0,9794
	8	0,5573	0,9348	0,9950
SCH	4	0,4865 ^a	0,9031	0,9840
	8	0,5541	0,9721	0,9993
AR	4	0,5118	0,8855	0,9791
	8	0,5459	0,9311	0,9948
ARH	4	0,4698	0,9003	0,9874
	8	0,5340	0,9677	0,9992
TOEP	4	0,4776	0,8769	0,9779
	8	0,4250	0,8801	0,9891
TOEPH	4	0,3556 ^a	0,8718	0,9822
	8	0,1719	0,9357	0,9979
TOEP (2)	4	0,5108	0,8842	0,9791
	8	0,5439	0,9310	0,9948
TOEPH (2)	4	0,4560 ^a	0,8998	0,9871
	8	0,5286	0,9668	0,9992
TOEP (3)	4	0,5047	0,8870	0,9802
	8	0,5157	0,9249	0,9937
TOEPH (3)	4	0,3796 ^a	0,8881	0,9858
	8	0,4535	0,9639	0,9992
UN	4	0,3063	0,8413	0,9774
	8	nc	0,7674	0,9882

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 51 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão SC para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,1889	0,6015	0,9137
	8	0,1433	0,4846	0,8595
SC	4	0,8882	0,9988	1,0000
	8	0,9419	0,9999	1,0000
SCH	4	0,7978	0,9981	1,0000
	8	0,8181	0,9994	1,0000
AR	4	0,4367	0,9249	0,9967
	8	0,2439	0,6350	0,9083
ARH	4	0,4017	0,9141	0,9960
	8	0,1963	0,6049	0,8846
TOEP	4	0,7580	0,9960	0,9999
	8	0,7589	0,9987	0,9999
TOEPH	4	0,6091	0,9941	0,9999
	8	0,3650c	0,9954	1,0000
TOEP (2)	4	0,3087	0,7422	0,9594
	8	0,1777	0,5386	0,8764
TOEPH (2)	4	0,2246	0,6453	0,9221
	8	0,1242	0,4216	0,7905
TOEP (3)	4	0,3017	0,7019	0,9474
	8	0,1817 ^b	0,5443	0,8751
TOEPH (3)	4	0,1757	0,5765	0,9031
	8	0,1134 ^b	0,4263	0,7844
UN	4	0,5529	0,9901	0,9999
	8	nc	0,9536	0,9999

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 52 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão SCH para a estrutura de covariância dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,4898	0,9150	0,9964
	8	0,3755	0,8539	0,9915
SC	4	0,9486	0,9997	1,0000
	8	0,9742	1,000	1,0000
SCH	4	0,8645	0,9996	1,0000
	8	0,9048	0,9998	1,0000
AR	4	0,7091	0,9907	1,0000
	8	0,4593	0,9272	0,9980
ARH	4	0,6761	0,9915	1,0000
	8	0,5738	0,9831	1,0000
TOEP	4	0,8121	0,9978	1,0000
	8	0,7168	0,9978	0,9999
TOEPH	4	0,7283 ^a	0,9984	1,0000
	8	0,4937	0,9993	1,0000
TOEP (2)	4	0,5888	0,9474	0,9976
	8	0,4030	0,8842	0,9943
TOEPH (2)	4	0,4765 ^a	0,9499	0,9987
	8	0,4142	0,9503	0,9995
TOEP (3)	4	0,4778	0,9185	0,9967
	8	0,3712	0,8788	0,9940
TOEPH (3)	4	0,3649 ^a	0,9402	0,9983
	8	0,3597	0,9511	0,9996
UN	4	0,6303	0,9966	1,0000
	8	nc	0,9717	1,0000

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 53 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão AR para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,2273	0,5637	0,8280
	8	0,2245	0,5071	0,7387
SC	4	0,6592	0,9362	0,9919
	8	0,5271	0,8195	0,9440
SCH	4	0,5319	0,9140	0,9891
	8	0,3779	0,7629	0,9203
AR	4	0,4219	0,8496	0,9750
	8	0,2561	0,6174	0,8351
ARH	4	0,3861	0,8388	0,9723
	8	0,1996	0,5900	0,8183
TOEP	4	0,4126	0,8274	0,9658
	8	0,2719	0,5898	0,8159
TOEPH	4	0,2965	0,7935	0,9623
	8	0,0719	0,5183	0,7827
TOEP (2)	4	0,3703	0,7614	0,9390
	8	0,2550	0,5732	0,8011
TOEPH (2)	4	0,2739	0,6760	0,9011
	8	0,1773 ^b	0,4904	0,7432
TOEP (3)	4	0,2522	0,6508	0,8900
	8	0,2338 ^b	0,5698	0,8052
TOEPH (3)	4	0,1769	0,5651	0,8410
	8	0,1446 ^b	0,4884	0,7441
UN	4	0,2688	0,7678	0,9552
	8	nc	0,3528	0,6660

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 54 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão ARH para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,4686	0,8729	0,9845
	8	0,4020	0,7870	0,9555
SC	4	0,8190	0,9897	0,9995
	8	0,7087	0,9591	0,9973
SCH	4	0,7188	0,9874	0,9994
	8	0,6386	0,9725	0,9991
AR	4	0,6496	0,9702	0,9982
	8	0,4323	0,8834	0,9894
ARH	4	0,6150	0,9770	0,9989
	8	0,5313	0,9664	0,9991
TOEP	4	0,5849	0,9609	0,9978
	8	0,3689	0,8374	0,9831
TOEPH	4	0,4771 ^a	0,9649	0,9984
	8	0,1745	0,9344	0,9980
TOEP (2)	4	0,6041	0,9455	0,9956
	8	0,4425	0,8537	0,9809
TOEPH (2)	4	0,5033 ^a	0,9430	0,9962
	8	0,4355	0,9352	0,9963
TOEP (3)	4	0,4497	0,8990	0,9900
	8	0,3947	0,8445	0,9836
TOEPH (3)	4	0,3620 ^a	0,9042	0,9936
	8	0,3677	0,9398	0,9973
UN	4	0,4103	0,9428	0,9971
	8	nc	0,7474	0,9831

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 55 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEP para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,2291	0,5540	0,8265
	8	0,2089	0,4840	0,7286
SC	4	0,6823	0,9414	0,9915
	8	0,6132	0,8879	0,9759
SCH	4	0,5572	0,9176	0,9887
	8	0,4461	0,8410	0,9613
AR	4	0,4914	0,8837	0,9807
	8	0,2843	0,6687	0,8825
ARH	4	0,4496	0,8740	0,9798
	8	0,2214	0,6448	0,8704
TOEP	4	0,4107 ^a	0,8193	0,9630
	8	0,2916	0,6402	0,8668
TOEPH	4	0,2880	0,7789	0,9572
	8	0,0911 ^c	0,5609	0,8356
TOEP (2)	4	0,4245	0,7987	0,9540
	8	0,2459	0,5622	0,8022
TOEPH (2)	4	0,2886	0,6985	0,9137
	8	0,1634 ^b	0,4658	0,7373
TOEP (3)	4	0,2609	0,6700	0,9001
	8	0,2244	0,5812	0,8263
TOEPH (3)	4	0,1785 ^a	0,5685	0,8474
	8	0,1381 ^b	0,4743	0,7498
UN	4	0,2594	0,7517	0,9492
	8	nc	0,3855	0,7309

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 56 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEPH para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,4653	0,8701	0,9811
	8	0,3880	0,7843	0,9523
SC	4	0,8350	0,9903	0,9989
	8	0,7921	0,9833	0,9994
SCH	4	0,7277	0,9884	0,9991
	8	0,7061	0,9875	0,9999
AR	4	0,7021	0,9811	0,9988
	8	0,4940	0,9241	0,9957
ARH	4	0,6631	0,9828	0,9991
	8	0,6100	0,9823	0,9997
TOEP	4	0,5980 ^a	0,9612	0,9968
	8	0,4100	0,8848	0,9909
TOEPH	4	0,4717 ^a	0,9640	0,9980
	8	0,2325	0,9627	0,9991
TOEP (2)	4	0,6447	0,9548	0,9955
	8	0,4448	0,8518	0,9805
TOEPH (2)	4	0,5334 ^a	0,9517	0,9962
	8	0,4377	0,9329	0,9967
TOEP (3)	4	0,4713	0,9056	0,9904
	8	0,4117	0,8677	0,9862
TOEPH (3)	4	0,3891 ^a	0,9244	0,9931
	8	0,3919	0,9489	0,9983
UN	4	0,4131	0,9444	0,9968
	8	nc	0,7961	0,9912

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 57 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEP (2) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,2372	0,5041	0,7152
	8	0,2578	0,5100	0,7227
SC	4	0,3753	0,6609	0,8408
	8	0,3372	0,6121	0,8059
SCH	4	0,3019	0,6329	0,8275
	8	0,2516	0,5809	0,7953
AR	4	0,2794	0,6031	0,8123
	8	0,2102	0,4559	0,6851
ARH	4	0,2557	0,6144	0,8219
	8	0,1640	0,4614	0,7077
TOEP	4	0,2589 ^a	0,5247	0,7497
	8	0,2627	0,5060	0,7389
TOEPH	4	0,1889	0,5298	0,7695
	8	0,0572	0,4859	0,7574
TOEP (2)	4	0,2969	0,6166	0,8216
	8	0,2434	0,5001	0,7233
TOEPH (2)	4	0,2639	0,6083	0,8203
	8	0,2022	0,4960	0,7320
TOEP (3)	4	0,2489	0,5587	0,7812
	8	0,1969	0,4369	0,6756
TOEPH (3)	4	0,1955	0,5593	0,7977
	8	0,1289	0,4627	0,7285
UN	4	0,1730	0,4894	0,743
	8	nc	0,3290	0,6634

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 58 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEPH (2) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,4227	0,7935	0,9431
	8	0,4116	0,7722	0,9422
SC	4	0,5138	0,8903	0,9768
	8	0,5027	0,8449	0,9679
SCH	4	0,5080	0,8829	0,9790
	8	0,4970	0,9132	0,9912
AR	4	0,3467	0,8692	0,9736
	8	0,3356	0,7275	0,9343
ARH	4	0,3897	0,8743	0,9779
	8	0,3786	0,8761	0,9887
TOEP	4	0,3678	0,8285	0,9632
	8	0,3467	0,7384	0,9410
TOEPH	4	0,1229	0,8150	0,9657
	8	0,1017	0,8721	0,9913
TOEP (2)	4	0,4016	0,8864	0,9787
	8	0,3905	0,7711	0,9482
TOEPH (2)	4	0,4366	0,8757	0,9811
	8	0,4153	0,8952	0,9913
TOEP (3)	4	0,3227	0,8442	0,9687
	8	0,3015	0,7135	0,9315
TOEPH (3)	4	0,2783	0,8389	0,972
	8	0,2572	0,8809	0,9913
UN	4	0,2751	0,7650	0,9529
	8	nc	0,6975	0,9723

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 59 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEP (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,2334	0,5260	0,7634
	8	0,2507	0,4790	0,6900
SC	4	0,5572	0,8442	0,9502
	8	0,3890	0,6539	0,8300
SCH	4	0,4334	0,8029	0,9338
	8	0,2902	0,6088	0,8066
AR	4	0,4149	0,7784	0,9205
	8	0,2302	0,4950	0,7212
ARH	4	0,3756	0,7617	0,9122
	8	0,1801	0,4955	0,7396
TOEP	4	0,2613 ^a	0,5982	0,8154
	8	0,2450	0,5026	0,7457
TOEPH	4	0,1530 ^a	0,5203	0,7738
	8	0,0755	0,4692	0,7479
TOEP (2)	4	0,3458	0,6611	0,8455
	8	0,2553	0,4993	0,7164
TOEPH (2)	4	0,2262	0,5397	0,7735
	8	0,2048	0,4652	0,6939
TOEP (3)	4	0,2582	0,5908	0,8114
	8	0,2140	0,4949	0,7324
TOEPH (3)	4	0,1782	0,5397	0,7856
	8	0,1599	0,4704	0,7215
UN	4	0,1718	0,5140	0,7663
	8	nc	0,3177	0,6292

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 60 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão TOEPH (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,4588	0,8200	0,9630
	8	0,3477	0,7199	0,9219
SC	4	0,7464	0,9563	0,9955
	8	0,6353	0,8452	0,9736
SCH	4	0,6239	0,9468	0,9953
	8	0,5128	0,8357	0,9898
AR	4	0,6299	0,9325	0,9912
	8	0,5188	0,8214	0,9527
ARH	4	0,5769	0,9340	0,9936
	8	0,4658	0,8239	0,9907
TOEP	4	0,4665 ^a	0,8655	0,9795
	8	0,3554 ^a	0,7544	0,9499
TOEPH	4	0,3135 ^a	0,8610	0,9815
	8	0,2024 ^a	0,7509	0,9925
TOEP (2)	4	0,5587	0,8777	0,9770
	8	0,4476	0,7667	0,9420
TOEPH (2)	4	0,4242 ^a	0,8426	0,9724
	8	0,3131 ^a	0,7315	0,9860
TOEP (3)	4	0,4288	0,8267	0,9673
	8	0,3177	0,7156	0,9562
TOEPH (3)	4	0,3918 ^a	0,8802	0,9833
	8	0,2807 ^a	0,7791	0,9888
UN	4	0,2917	0,8086	0,9689
	8	nc	0,7975	0,9657

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 61 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas. Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão BAND (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,2475	0,5583	0,7862
	8	0,2517	0,5210	0,7403
SC	4	0,5286	0,8383	0,9539
	8	0,3932	0,6781	0,8562
SCH	4	0,4158	0,8017	0,9409
	8	0,2907	0,6263	0,8299
AR	4	0,3417	0,6747	0,8662
	8	0,2352	0,4930	0,7195
ARH	4	0,2996	0,6564	0,8596
	8	0,1865	0,4690	0,7047
TOEP	4	0,2870 ^a	0,6480	0,8598
	8	0,2513	0,5246	0,7639
TOEPH	4	0,1654	0,5800	0,8314
	8	0,0628	0,4801	0,7479
TOEP (2)	4	0,2983	0,5959	0,8012
	8	0,2566	0,5142	0,7370
TOEPH (2)	4	0,2263	0,5374	0,7653
	8	0,1945	0,4745	0,7093
TOEP (3)	4	0,2952	0,6585	0,8631
	8	0,2281	0,5434	0,7822
TOEPH (3)	4	0,2043	0,6086	0,8429
	8	0,1690	0,5026	0,7540
UN	4	0,1895	0,5677	0,8156
	8	nc	0,3179	0,6318

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

Tabela 62 – Poder estatístico para o teste de hipótese da interação entre tratamentos e medidas repetidas provenientes da análise com modelos lineares mistos a partir dos seguintes pressupostos sobre a estrutura de covariância empírica dos dados: componentes de variância – CV, simetria composta – SC, autorregressivo – AR, Toeplitz – TOEP, Toeplitz 2 – TOEP (2), Toeplitz 3 – TOEP (3) e sem estrutura – UN, além das versões com variâncias heterogêneas, Os valores correspondem a proporção de rejeição de H_0 relativo à análise de 10,000 conjunto de dados com provenientes de experimentos simulados com medidas repetidas envolvendo 4 e 8 medidas repetidas, tamanho amostral de 4, 8 e 12, e padrão BANDH (3) para a estrutura de covariância empírica dos dados, com $\alpha = 0,05$

Estrutura de covariância	Número de medidas repetidas	Tamanho amostral		
		4	8	12
CV	4	0,4738	0,8426	0,9684
	8	0,4222	0,7816	0,9495
SC	4	0,7147	0,9615	0,9957
	8	0,5769	0,8912	0,9809
SCH	4	0,6186	0,9602	0,9973
	8	0,5329	0,9308	0,9922
AR	4	0,5388	0,8938	0,9827
	8	0,3845	0,7658	0,9489
ARH	4	0,5020	0,9104	0,9882
	8	0,4089	0,8788	0,9860
TOEP	4	0,4829 ^a	0,8980	0,9869
	8	0,3508	0,7800	0,9639
TOEPH	4	0,3461 ^a	0,9227	0,9929
	8	0,1305	0,8682	0,9899
TOEP (2)	4	0,4983	0,8460	0,9689
	8	0,4150	0,7804	0,9503
TOEPH (2)	4	0,4286 ^a	0,8591	0,9768
	8	0,4197	0,8779	0,9840
TOEP (3)	4	0,4613	0,8791	0,9820
	8	0,3915	0,8229	0,9704
TOEPH (3)	4	0,4191 ^a	0,9315	0,9942
	8	0,3288	0,8934	0,9908
UN	4	0,3435	0,8939	0,9893
	8	nc	0,6529	0,9566

Exceto quando especificado, todos os valores representam convergência superior a 99,9%.

Convergência: 99,9% > a ≥ 90,0%; 90,0% > b ≥ 80,0%; 80,0 > c ≥ 70,0%; 70,0 > d ≥ 60,0%; nc < 60%.

APÊNDICE F – Códigos em Python e SAS utilizados no experimento

```

import numpy as np
import pandas as pd
from numpy.linalg import pinv as inv
from numpy import diagonal as dg
from numpy.random import multivariate_normal

def simulation1(a, b, rep, Vb, *args):

    trt_efeito          = args[ 0 ]
    dias_efeito          = args[ 1 ]
    inter_efeito         = args[ 2 ]

    if b == 4:
        mean             = (0, 0, 0, 0)
    elif b == 8:
        mean             = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)

    random_data          = multivariate_normal(mean,Vb,rep)
    y                    = np.zeros( (rep, b) )

    for i in range (rep):
        for j in range(b):
            y[i][j]      = + 50 \
                           + trt_efeito[i][j] \
                           + dias_efeito[i][j] \
                           + inter_efeito[i][j] \
                           + random_data[i][j]

    trt                  = 2

```

```

dias                                = 4
/* Estudo sobre Erro do Tipo I */
trt_                                = [+0.5, +0.5]
/* Estudo sobre Poder Estatístico */
trt_                                = [+0.5, -0.5]
trt_efeito_                         = [x*1 for x in trt_]

def E(rep,dias):

    if dias == 4:

        dias_                        = [+0.5, +0.25, -0.25, -0.5]
        dias_efeito_                 = [x*10 for x in dias_]

        interacao                    = ( np.kron(trt_,dias_).reshape(2,4) ) * 2

    /* Estudo sobre Erro do Tipo I */
    dmd = 1
    /* Estudo sobre Poder Estatístico */
    dmd = 2

    inter_1_                         = interacao[0, :] * (dmd)
    inter_2_                         = interacao[1, :] * (dmd)

    desvio                           = 2
    E.desvio                         = desvio

    /* Estudo sobre Erro do Tipo I */
    desvios_hete                     = [1.25,1.75,2.25,2.75]
    /* Estudo sobre Poder Estatístico */
    desvios_hete                     = [1.00,1.25,1.50,2.00]

```

```
E.desvios_hete = desvios_hete
```

```
elif dias == 8:
```

```
    dias_ = [+0.500, +0.125, +0.000, -0.125, -0.250, -0.350, -
0.450, -0.500]
```

```
    dias_efeito_ = [x*10 for x in dias_]
```

```
    interacao = (np.kron(trt_,dias_).reshape(2,8))*2
```

```
/* Estudo sobre Erro do Tipo I */
```

```
dmd = 1
```

```
/* Estudo sobre Poder Estatístico */
```

```
dmd = 2
```

```
inter_1_ = interacao[0, :] * (dmd)
```

```
inter_2_ = interacao[1, :] * (dmd)
```

```
desvio = 2
```

```
E.desvio = desvio
```

```
desvios_hete = [1.25,1.50,1.75,2.00,2.25,2.50,2.75,3.00]
```

```
E.desvios_hete = desvios_hete
```

```
trt_efeito = np.kron(np.array(trt_efeito_).reshape(trt,1), \
                    np.ones((int((rep*dias)/2),1)))
```

```
E.trt_efeito = np.reshape(trt_efeito,(rep,dias))
```

```
dias_efeito = np.kron(np.ones((rep,1)),
                    np.array(dias_efeito_).reshape(dias,1))
```

```
E.dias_efeito = np.reshape(dias_efeito,(rep, dias))
```

```

trt_1          = np.kron(np.ones((int(rep/2),1)), \
                        np.array(inter_1_).reshape(dias,1))
trt_2          = np.kron(np.ones((int(rep/2),1)), \
                        np.array(inter_2_).reshape(dias,1))
inter_efeito   = np.vstack((trt_1,trt_2))
E.inter_efeito = np.reshape(inter_efeito,(rep, dias))

```

A seguir, são apresentadas as funções para gerar as estruturas de covariância empíricas.

Independência - I

```
def I(rep, dias):
```

```

    E(rep, dias)
    cov_dias = np.zeros( (dias, dias) )

    for i in range(dias):
        for j in range(dias):
            if i == j:
                cov_dias[i, j] = E.desvio**2

```

```
simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)
```

Componentes de variância - CV

```
def CV(rep, dias):
```

```

    E(rep, dias)
    cov_dias = np.zeros( (dias , dias) )

    for i in range(dias):
        for j in range(dias):

```

```

if i == j:
    cov_dias[i, j] = ( E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j] )

```

```

simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)

```

Simetria composta - SC

```

def SC(rep, dias):

```

```

    E(rep, dias)

```

```

    rho = 0.75

```

```

    cov_dias = np.zeros( (dias, dias) )

```

```

    for i in range(dias):

```

```

        for j in range(dias):

```

```

            if i == j:

```

```

                cov_dias[i, j] = E.desvio**2

```

```

            else:

```

```

                cov_dias[i, j] = rho*( E.desvio**2 )

```

```

    simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)

```

Simetria composta heterogênea – SCH

```

def SCH(rep, dias)

```

```

    E(rep, dias)

```

```

    rho = 0.75

```

```

    cov_dias = np.zeros( (dias, dias) )

```

```

    for i in range(dias):

```

```

for j in range(dias):
    if i == j:
        cov_dias[i, j] = E.desvios_hete[i] * E.desvios_hete[j]
    else:
        cov_dias[i, j] = ( E.desvios_hete[i] * E.desvios_hete[j] ) * rho

simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)

```

Autorregressivo de primeira ordem - AR (1)

```

def AR(rep, dias):
    E(rep, dias)
    rho = 0.75
    cov_dias = np.zeros( (dias, dias) )

    for i in range(dias):
        for j in range(dias):
            if i == j:
                cov_dias[i, j] = E.desvio**2
            else:
                cov_dias[i, j] = ( E.desvio**2 ) * ( rho**abs(i - j) )

    simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)

```

Autorregressivo de primeira ordem com variâncias heterogêneas – ARH (1)

```

def ARH(rep, dias):
    E(rep, dias)
    rho = 0.75

    cov_dias = np.zeros( (dias, dias) )
    for i in range(dias):
        for j in range(dias):

```

```

    if i == j:
        cov_dias[i, j] = ( E.desvios_hete[i] * E.desvios_hete[j] )
    else:
        cov_dias[i, j] = ( E.desvios_hete[i] * E.desvios_hete[j] ) *
            ( rho**abs(i - j) )

```

```

simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)

```

Toeplitz – TOEP

```

def TOEP(rep, dias):
    E(rep, dias)
    cov_dias = np.zeros( (dias, dias) )

    for i in range(dias):
        for j in range(dias):
            if i == j:
                cov_dias[i, j] = E.desvio**2
            elif ((abs(j-i))) == 1:
                cov_dias[i, j] = 0.8*E.desvio**2
            elif ((abs(j-i))) == 2:
                cov_dias[i, j] = 0.6*E.desvio**2
            elif ((abs(j-i))) == 3:
                cov_dias[i, j] = 0.4*E.desvio**2

    simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)

```

Toeplitz com variâncias heterogêneas – TOEPH

```

def TOEPH(rep, dias):
    E(rep, dias)
    cov_dias = np.zeros((dias, dias))

    for i in range(dias):

```

```

for j in range(dias):
    if i == j:
        cov_dias[i, j] = (E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j])
    elif ((abs(j-i)) == 1):
        cov_dias[i, j] = (E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j])*0.80
    elif ((abs(j-i)) == 2):
        cov_dias[i, j] = (E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j])*0.60
    elif ((abs(j-i)) == 3):
        cov_dias[i, j] = (E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j])*0.40

simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)

```

Toeplitz (2) – TOEP (2)

```

def TOEP2(rep, dias):
    E(rep, dias)
    cov_dias = np.zeros((dias, dias))

    for i in range(dias):
        for j in range(dias):
            if i == j:
                cov_dias[i, j] = E.desvio**2
            elif ((abs(j-i)) == 1):
                cov_dias[i, j] = 0.8*E.desvio**2

    simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)

```

Toeplitz (2) com variâncias heterogêneas – TOEPH (2)

```

def TOEP2H(rep, dias):
    E(rep, dias)
    cov_dias = np.ones((dias, dias))
    for i in range(dias):
        for j in range(dias):

```

```

        if i == j:
            cov_dias[i, j] = (E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j])
        elif ((abs(j-i))) == 1:
            cov_dias[i, j] = (E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j])*0.8
        else:
            cov_dias[i, j] = 0
    simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)

```

Toeplitz (3) - TOEPH (3)

```

def TOEP3(rep, dias):
    E(rep, dias)
    cov_dias = np.zeros((dias, dias))

    for i in range(dias):
        for j in range(dias):
            if i == j:
                cov_dias[i, j] = E.desvio**2
            elif ((abs(j-i))) == 1:
                cov_dias[i, j] = 0.8*E.desvio**2
            elif ((abs(j-i))) == 2:
                cov_dias[i, j] = 0.6*E.desvio**2

    simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)

```

Toeplitz (3) com variâncias heterogêneas - TOEPH (3)

```

def TOEP3H(rep, dias):
    E(rep, dias)
    cov_dias = np.ones((dias, dias))

    for i in range(dias):
        for j in range(dias):

```

```

if i == j:
    cov_dias[i, j] = (E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j])
elif ((abs(j-i))) == 1:
    cov_dias[i, j] =
(E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j])*0.8
elif ((abs(j-i))) == 2:
    cov_dias[i, j] =
(E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j])*0.6
else:
    cov_dias[i, j] = 0

```

```
simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)
```

Bandas - BAND (3)

```
def BAND3(rep, dias):
```

```
    E(rep, dias)
```

```
    rho = 0.6
```

```
    cov_dias = np.zeros((dias, dias))
```

```
    for i in range(dias):
```

```
        for j in range(dias):
```

```
            if i == j:
```

```
                cov_dias[i, j] = E.desvio**2
```

```
            elif ((abs(j-i))) == 1:
```

```
                cov_dias[i, j] = rho*E.desvio**2
```

```
            elif ((abs(j-i))) == 2:
```

```
                cov_dias[i, j] = rho*E.desvio**2
```

```
simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)
```

Bandas com variâncias heterogêneas – BANDH (3)

```
def BAND3H(rep, dias):
```

```
    E(rep,m)
```

```
        rho = 0.6
```

```
        cov_dias = np.ones((dias, dias))
```

```
        for i in range(dias):
```

```
            for j in range(dias):
```

```
                if i == j:
```

```
                    cov_dias[i, j] = (E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j])
```

```
                elif ((abs(j-i)) == 1):
```

```
                    cov_dias[i, j] = (E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j])*rho
```

```
                elif ((abs(j-i)) == 2):
```

```
                    cov_dias[i, j] = (E.desvios_hete[i]*E.desvios_hete[j])*rho
```

```
                else:
```

```
                    cov_dias[i, j] = 0
```

```
    simulation(trt, dias, rep, cov_dias, E.trt_efeito, E.dias_efeito, E.inter_efeito)
```

```

from functions import simulation
import numpy as np
import pandas as pd
from numpy.random import seed
seed(23589434)

def simulation2(pattern, files):

    reps = [8, 16, 24]
    times = [4, 8]
    all_simulation = [ ]
    rep_frame_ = [ ]
    time_frame_ = [ ]
    simulation_frame_ = [ ]

    for r in range( len(reps) ):
        rep = reps[ r ]

        for t in range( len(times) ):
            time = times[ t ]

            simu_count = 0
            for i in range( ns ):
                simu_count += 1

                simulation = np.ones( (time*rep,1) ) * i
                simulation_frame_.append(simulation)
                rep_frame = np.ones( (time*rep, 1) ) * rep
                rep_frame_.append(rep_frame)
                time_frame = np.ones( (time*rep,1) ) * time
                time_frame_.append( time_frame )

            pattern(rep, time)
            dset = simulation.data

```

```
dset = np.asarray(dset)
all_simulation.append(dset)
```

```
print(
'SIMULAÇÃO:',simu_count,"|",
'PADRÃO:',files,"|",
'REP-NUMBER:',reps[r],"|",
'DAYS-NUMBER:',times[ t ]
)
```

```
rep_frame = np.concatenate(rep_frame_, axis=0)
time_frame = np.concatenate(time_frame_, axis=0)
simulation_frame = np.concatenate(simulation_frame_, axis=0)
all_simulation = np.concatenate(all_simulation, axis=0)
```

```
all_ = pd.DataFrame(all_simulation, columns = ['TRT', 'DIAS', 'SUJEITO', 'Y'])
all_.insert(0, "REPNUMBER", rep_frame, True)
all_.insert(1, "NUMBER_DE_DIAS", time_frame, True)
all_.insert(2, "SIMULACAO", simulation_frame, True)
simu10.all_ = all_
```

```
def simulation3():
```

```
patterns = np.asarray(
[I,CV,SC,SCH,AR,ARH,TOEP,TOEPH,TOEP2,TOEP2H,TOEP3,TOEP3H,BA
ND3,BAND3H] )
files = np.asarray(
["I","CV","SC","SCH","AR","ARH","TOEP","TOEPH","TOEP2","TOEPH2H","TO
EP3","TOEP3H","BAND3","BAND3H"] )
```

```
for i in range( len(files) ):
simulation2( patterns[i], files[i] )
```

```
simulation2.all_.to_csv('./datasets/' + files[i] + '.csv', index=False)
simulation3()
```

Códigos para análise dos conjuntos de dados simulados com modelos lineares mistos em SAS são apresentados a seguir:

```
data dados;
    infile 'c:\users\lucas\desktop\lucas vieira\datasets\type1study\AR.csv' dlm=',';
firstobs=2;
    input n_rep n_dias simulacao trt dias jar y;
run;

data dados1;
    set dados;
run;

proc sort data=dados1;
    by n_rep n_dias simulacao trt dias jar;
run;

ods exclude all;
proc glimmix data=dados1;
    where n_rep = 24 and n_dias = 8;
    by simulacao;
    class trt dias jar;
    model y = trt dias trt*dias / ddfm=kr covb;
    random dias / residual type = UN subject = jar(trt);
    parms / lowerb=1e-4,.,1e-4;
    ods output tests3 = t3;
run;

dm 'log;
print file = "erros.txt" replace';

data read_txt;
    infile 'erros.txt' truncover lrecl= 200;
    length string1 $ 200 type $ 10;
    input @1 string1 $char200.;
    if substr(string1,1,4) notin ('error') then word=upcase(scan(string1,2));
    if substr(string1,1,5) = 'error' then do;
        type='error';
        output;
    end;
run;
```

146

```
data erros;
    set read_txt;
    errorr = 0;
    if type='error' then errorr=1;
run;
```

```
proc means data= erros sum noprint;
    var errorr;
    output out=type1 sum=totalerros;
run;
```

```
proc export data=type1
    outfile='un_erros.txt'
    dbms=tab replace;
run;
```

```
data t3;
    set t3;
    where effect = "trt*dias";
run;
```

```
proc contents data=t3;
run;
```

```
proc sort data=t3(keep=simulacao probf dendf);
    by simulacao;
run;
```

```
data summary;
    merge t3 ;
    by simulacao;
run;
```

```
data summary2;
    set summary ;
    reject=0; if probf<0.05 then reject=1;
run;
```

```
proc means data= summary2 sum noprint;
    var reject;
    output out=type1 sum=totalreject;
run;
```

```
data type1; set type1;
    alphas=totalreject/_freq_;
    label _freq_="simnumber";
run;
```

```
data alpha_un;  
    padrao="un";  
    set type1(keep=alphat);  
run;
```

```
proc export data= alpha_un  
    outfile='alpha_ar.txt'  
    dbms=tab replace;  
run; quit;
```