



Otimização de fatores para a clonagem em *Coffea arabica* utilizando experimentos rotacionais subdivisíveis em blocos e correlação canônica

Haiany Aparecida FERREIRA *¹, Tiago Teruel REZENDE ¹, Marcelo Ângelo CIRILLO ¹

¹ Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil.

*E-mail: haianyferreira@gmail.com

Submetido em: 01/08/2023; Aceito em: 09/09/2024; Publicado em: 23/09/2024.

RESUMO: A produção de mudas de *Coffea arabica* L., via enraizamento de segmentos caulinares, possibilita a exploração comercial de híbridos e representa um avanço nos programas de melhoramento genético de *Coffea arabica*. Nesse trabalho, avaliamos se a modelagem de um conjunto de dados oriundos de um delineamento composto central rotacional (DCCR) com e sem blocagem, pode otimizar o enraizamento de segmentos caulinares de *Coffea arabica*, utilizando uma abordagem multivariada e índices de redundância da variabilidade amostral. Os dados utilizados foram oriundos de experimentos DCCR e D-ótimo para a avaliação de três fatores (substrato, sacarose e tiometoxam). Segundo a especificação da matriz de DCCR subdivisível em blocos, foi proposto um modelo multivariado, e, na sequência a construção da matriz bloco, considerando dois blocos diagonais: o primeiro bloco composto pelos dados oriundos do experimento, e o segundo pelos dados otimizados pelo critério D-ótimo. Mediante os resultados ótimos obtidos pela análise ridge para cada delineamento, em função dos objetivos máximos e mínimos. Em se tratando do delineamento DCCR-ótimo e DCCR subdivisível em blocos para a resposta de máximo não houve diferenças discrepantes entre os níveis de sacarose e tiometoxam. Contudo, para substrato, esses níveis foram reduzidos. Recomenda-se a blocagem nos delineamentos DCCR na abordagem original e otimizada, nomeado como subdivisível em blocos.

Palavras-chave: delineamento composto central rotacional; D-ótimo; índice de redundância.

Factor optimization for cloning in *Coffea arabica* using block subdivisible rotational experiments and canonical correlation

ABSTRACT: The production of seedlings of *Coffea arabica* L. via rooting of stem segments enables the commercial exploitation of hybrids, representing an advance in genetic improvement programs for *Coffea arabica*. Thus, the objective was to evaluate the modeling of a set of data from a central composite rotational design (CCRD) with and without blocking, used in the optimization of rooting of stem segments of *Coffea arabica*, using a multivariate approach and analysis of the indices of redundancy of sample variability. The data from CCRD and D-optimal experiments evaluated three factors (substrate, sucrose and thiamethoxam). Following the specification of the CCRD matrix subdivisible into blocks, a multivariate model was proposed, and then the construction of the block matrix considering two diagonal blocks, the first block consisting of data from the experiment and the second by data optimized by criterion D-optimal. In the case of CCRD - optimal design and subdivisible CCRD in blocks for the maximum response, it was noticed that there were no discrepant differences between sucrose and thiamethoxam levels; however, for substrate, the level was reduced. Blocking is recommended in CCRD designs using the original and optimized approach, named subdivisible in blocks.

Keywords: central composite rotational design; D-optimal; redundancy index.

1. INTRODUÇÃO

Das diversas espécies do gênero *Coffea*, apenas duas são de interesse comercial, sendo a *Coffea arabica* L. (café arábica) e a *Coffea canephora* Pierre (café robusta) (SAKIYAMA et. al., 2017). Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a produção mundial de café na safra 2021/2022 foi de aproximadamente 165.380 milhões de sacas (60 kg), sendo 53% oriundas de lavouras de *Coffea arabica* e 47% de *Coffea canephora*. O Brasil responde como o maior produtor (35%) e responsável pela produção de 42% de todo o café arábica e 28% de todo o café robusta da produção mundial (USDA, 2023). Segundo o Conselho dos

Exportadores de Café do Brasil (CECAFE), o café gerou uma receita cambial de US\$ 9,23 bilhões em 2022, com a exportação de 39,35 milhões de sacas (CECAFE, 2023). Além disso, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), o cultivo de café arábica e robusta ocupa 2,27 milhão de hectares (CONAB, 2023).

Dada a importância da cafeicultura no cenário do agronegócio brasileiro, nota-se os esforços no desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem o aumento da produtividade e sustentabilidade da atividade cafeeira. Essas ações estão baseadas em diversos fatores associados a mecanização e automação de plantio e da

colheita, melhoria nas técnicas de manejo e tecnologia de aplicação, desenvolvimento de cultivares resistentes a doenças via melhoramento genético (MOREIRA et al., 2019). Atualmente os programas de melhoramento genético do cafeiro têm como objetivo o desenvolvimento de cultivares com características agronômicas como resistência à pragas e doenças, tolerância a estresse abiótico, melhor qualidade de bebida e elevado potencial produtivo, entretanto, o desenvolvimento desses programas encontra limitações devido à baixa variabilidade genética em *Coffea arabica* (SETOTAW et al., 2013; MEDEIROS et al., 2021).

A utilização de ferramentas biotecnológicas como os marcadores moleculares e a propagação vegetativa de híbridos podem ser estratégias importantes para a obtenção de cultivares com alto potencial produtivo e com características tecnológicas de interesse supracitadas. Com a existência de heterose em *Coffea arabica* (Geneti, 2019; Asefa et al., 2021; Merga et al., 2022), a exploração comercial de híbridos altamente produtivos se torna importante, uma vez que ganhos expressivos no rendimento e em outras características de interesse podem ser obtidas.

Para a espécie *Coffea arabica*, a propagação vegetativa é de interesse para a multiplicação de híbridos e genótipos superiores selecionados em qualquer etapa de um programa de melhoramento genético. Isso possibilita a fixação desses genótipos sem a necessidade de avançar gerações, o que pode representar um grande avanço nos programas de melhoramento (REZENDE et al., 2017). A propagação vegetativa em *Coffea arabica* é possível e viável da mesma forma que para a espécie *Coffea canephora*, necessitando da utilização de fitoreguladores e ambiente com temperatura e umidade controlados (JESUS et al., 2010). Alguns dos fatores já estudados e relatados na literatura são importantes para uma melhor eficiência do processo, como a concentração do fitoregulador, o comprimento, o tipo de segmento caulinar e o ambiente de aclimatação das mudas (REZENDE et al., 2010; REZENDE et al., 2017).

No entanto, esse processo ainda pode ser otimizado em função de outros fatores que afetam o desempenho do processo de enraizamento de segmentos caulinares, como relatados em outras espécies, e, que ainda não tiveram seus efeitos avaliados sobre o desempenho do enraizamento de segmentos caulinares de *Coffea arabica*; e, tão pouco a interação que esses fatores podem ter com o genótipo de interesse para a propagação. Portanto, existe a necessidade da criação de protocolos com diferentes fatores para a viabilização do enraizamento dos segmentos caulinares para diferentes genótipos (REZENDE et al., 2017). Nesse contexto, uma abordagem visando a otimização enraizamento de segmentos caulinares de *Coffea arabica* via planejamento de experimentos fatoriais pode ser uma alternativa viável, possibilitando a redução do tempo e recursos (Rodrigues; Iemma, 2015), quando comparada à outras abordagens e delineamentos comumente utilizadas na área agrícola.

Uma proposta frente a dados advindos de experimentos já realizados seria uma abordagem multivariada, considerando delineamentos compostos centrais rotacionais subdivisíveis em blocos (DCCR), contudo, decorrente da estrutura de subdivisão em blocos, em DCCRs, devido a pequenas perturbações e resultantes da matriz de informação que violam a suposição de ortogonalidade. Assim, é cabível a pesquisa de delineamentos otimizados utilizando diferentes

critérios alfabéticos de otimalidade (EZE, 2018), entre eles: D-ótimo, A-ótimo, bem como o processo de seleção da melhor escolha em um determinado conjunto de opções disponíveis

Existem deficiências teóricas em relação as propriedades de ortogonalidade dos delineamentos subdivisíveis em blocos, que carecem de uma seleção de um delineamento ótimo. Alternativamente, pode se considerar como opção a análise da variabilidade dos dados em uma técnica de redução de dimensão, em uma abordagem multivariada, mais especificamente o uso de variáveis canônicas (YUNJU, 2015), uma vez que, o uso desta metodologia, permite contemplar a variação “entre” e “dentro” dos tratamentos, por meio do primeiro par de variáveis canônicas; sendo este, preferencialmente utilizado por preservar a maior correlação entre os dois grupos de variáveis, caracterizados pelos delineamentos DCCR e DCCR ótimo, respectivamente, referindo-se ao primeiro e segundo bloco.

Assim, objetivou-se avaliar a modelagem de um conjunto de dados oriundos de um delineamento composto central rotacional (DCCR) com e sem blocagem, utilizado na otimização do enraizamento de segmentos caulinares de *Coffea arabica*, utilizando uma abordagem multivariada e análise dos índices de redundância da variabilidade amostral.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Delineamento composto central rotacional

O experimento foi conduzido na área experimental do Setor de Cafeicultura, localizada no Departamento de Agricultura na Escola de Ciências Agrárias de Lavras, da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras – MG. Foram utilizados os delineamentos composto central rotacional e D-ótimo para a avaliação de três fatores selecionados em etapas anteriores. Os fatores avaliados foram substrato, sacarose e tiometoxam.

Foram utilizados segmentos caulinares de ramos ortotrópicos de uma única progénie F₂ com características agronômicas de interesse. Os segmentos caulinares foram cortados e preparados para terem apenas um par de gemas vegetativas e um par de folhas. Os ramos foram submersos em solução contendo de hipoclorito de sódio (2,5%) durante 10 minutos.

Em seguida, as bases dos segmentos caulinares foram imersas em talco contendo o Ácido-Indol-Butírico (AIB) na concentração de 4.000 mg kg⁻¹. Posteriormente, foram acondicionadas em recipientes de propagação do tipo tubete (120cm³) contendo substrato composto por fibra de coco e casca de pinus em proporções (níveis) estabelecida em função do planejamento experimental (Tabela 1) com adubo de liberação controlada com as seguintes concentrações de minerais: 15% de N; 9% de K₂O; 12% de P₂O₅; 0,06% de Mg; 2,3% de S; 0,05% de Cu; 0,45% de Fe; 0,06% de Mn e 0,02% de Mo, na dose de 12,5g L⁻¹.

O fator tiometoxam (inseticida bioativador) foi aplicado logo após o acondicionamento dos segmentos caulinares no substrato, os níveis estão detalhados na Tabela 1. O fator sacarose foi aplicado no substrato em três épocas, sendo a primeira no momento da instalação, a segunda 15 dias após a instalação e a terceira 30 dias após a instalação dos experimentos.

Após oito meses do início do experimento, foram avaliadas algumas características, dentre elas estão: a matéria seca da parte aérea e do sistema radicular.

Para o planejamento do delineamento composto central para a metodologia de superfície de resposta foi utilizada a função *ccd* () da biblioteca *rsm* (LENTH, 2009). Para o planejamento do delineamento D-ótimo (KIEFER, 1959), o algoritmo *exchangeable* (FEDOROV, 1972) implementado em linguagem R. Assim, os dados coletados se encontram na Tabela 1.

2.2. Modelo Multivariado

Seguindo a especificação da matriz de delineamento composto central rotacional subdivisível em blocos, a proposta de um modelo multivariado foi dada conforme procedimento descrito a seguir.

$$Y = D\beta + \varepsilon \quad (01)$$

Tabela 1. Delineamento subdivisível em blocos com 40 tratamentos selecionados para efeitos principais e quadráticos dos fatores tiameksam, sacarose e substrato (% de fibra de coco no substrato de casca de pinus) em escala natural.

Table 1. A subdivisible block design with 40 treatments was selected for the main and quadratic effects of factors such as thiamethoxam, sucrose, and substrate (% coconut fiber in pine bark substrate) at full scale.

Bloco	Escala natural			Peso raiz (g)	Peso parte aérea (g)
	Substrato (fibra de coco)	Sacarose	Tiametoxam		
1	76,7	3,6	2,8	-	-
1	23,3	11,2	2,8	0,24	0,29
1	50	7,4	1,8	-	0,92
1	23,3	3,6	2,8	0,32	0,65
1	76,7	11,2	0,8	0,27	0,71
1	50	7,4	1,8	-	-
1	23,3	11,2	0,8	0,17	0,54
1	76,7	3,6	0,8	0,3	0,86
1	50	7,4	1,8	0,65	2,25
1	23,3	3,6	0,8	0,56	1,05
1	76,7	11,2	2,8	0,67	1,87
1	50	13,8	1,8	0,45	0,84
1	50	7,4	0,1	0,29	0,61
1	50	7,4	1,8	0,54	1,14
1	50	1	1,8	0,27	0,63
1	5,1	7,4	1,8	0,38	0,95
1	50	7,4	1,8	0,47	1,79
1	50	7,4	3,5	-	-
1	94,9	7,4	1,8	0,52	1,14
1	50	7,4	1,8	0,21	0,65
-1	76,7	11,2	2,8	0,34	0,7
-1	23,3	7,4	0,8	0,79	1,35
-1	76,7	11,2	0,8	0,36	0,88
-1	76,7	3,6	2,8	-	-
-1	76,7	3,6	0,8	0,19	0,46
-1	23,3	11,2	0,8	0,52	1,31
-1	50	7,4	0,8	-	-
-1	23,3	3,6	0,8	0,75	1,24
-1	50	3,6	1,8	0,43	1,24
-1	76,7	3,6	0,8	1,23	1,45
-1	76,7	7,4	1,8	0,8	1,43
-1	23,3	11,2	1,8	0,44	1,1
-1	76,7	7,4	2,8	-	0,38
-1	76,7	11,2	0,8	0,37	1,11
-1	23,3	3,6	2,8	0,65	1,3
-1	50	3,6	2,8	0,33	0,83
-1	23,3	7,4	2,8	0,44	1,17
-1	23,3	3,6	1,8	0,42	0,95
-1	23,3	11,2	2,8	0,75	1,65
-1	50	11,2	2,8	0,3	0,8

em que: $Y = (Y_1 \ Y_2 \ ... \ Y_r)'$ se trata da matriz das r respostas obtidas, $(\beta = \beta_1 \beta_2 \ ... \ \beta_r)'$ corresponde ao vetor paramétrico a ser estimado conjuntamente e $\varepsilon = (\varepsilon_1 \varepsilon_2 \ ... \ \varepsilon_r)'$ o vetor dos erros aleatórios associado ao j-ésimo experimento, isto é, $(j=1,...,r)$. Por fim, nesse trabalho tem-se D como uma matriz bloco diagonal definida por cada elemento na diagonal correspondente a um delineamento

$$D = \begin{pmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & D_2 \end{pmatrix} \quad (02)$$

A partir disso este estudo consiste na construção da matriz bloco diagonal considerando dois blocos, o primeiro composto pelos dados originais (DCCR), e o segundo, os dados otimizados pelo critério D-ótimo em conjunto com o algoritmo *exchangeable* para a geração de delineamentos ótimos (DCCR ótimo) conforme apresentado na Tabela 1.

2.3. Análise de correlação canônica e análise dos índices de redundância

Mediante isso, uma vez que estes dados são multivariados alguns procedimentos de otimização são necessários quando se trata da análise desses grupos de variáveis. Nesse caso, foram aplicados os métodos de análise de correlação canônica e análise de redundância.

A aplicação da análise de correlação canônica foi realizada seguindo o procedimento proposto por Lattin et al. (2011) com o intuito de pesquisar qual a melhor combinação linear de X e Y que resultarão na máxima correlação.

Desta forma, enunciando $\mu = Xb$ e $t = Ya$ representando, respectivamente, as combinações lineares de X e Y definidas como pares de variáveis canônicas. Logo, a máxima correlação foi determinada nos coeficientes a e b que maximizaram $r(t, \mu)$ dada em (3).

$$r(t, \mu) = \frac{1}{(n-1)} a' Y X b \quad (03)$$

sujeito as restrições definidas em

$$\begin{aligned} r(t, \mu) &= \frac{1}{(n-1)} a' Y X a = 1 \\ r(t, \mu) &= \frac{1}{(n-1)} b' Y X b = 1 \end{aligned} \quad (04)$$

Desta forma, seguindo o procedimento de estimação por meio da máxima verossimilhança, as estimativas das cargas canônicas que relaciona as correlações entre as variáveis originais e canônicas foram determinadas e descritas nas expressões a seguir, respectivamente referindo-se as correlações X e μ e Y e t.

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{(n-1)} X' \mu = \frac{1}{(n-1)} X' (Xb) = R_{Xb} \\ g &= \frac{1}{(n-1)} Y' t = \frac{1}{(n-1)} Y' (Ya) = R_{Ya} \end{aligned} \quad (05)$$

Com a obtenção destes resultados, os índices de redundância que explicam a relação da variação de uma combinação linear dada em t são explicadas por parte da variação de Y e, de forma análoga, a variação da combinação linear de μ é explicada por parte da variação de X. Os índices de redundância foram estimados conforme as expressões a seguir.

$$\begin{aligned} R_d(t|\mu) &= \frac{r^2(t|\mu)(g'g)}{p} \\ R_d(\mu|t) &= \frac{r^2(t|\mu)(f'f)}{p} \end{aligned} \quad (06)$$

Em conformidade com a metodologia descrita, para aplicação do estudo proposto os dados foram divididos em dois grupos: os dados originais oriundos dos fatores e características dos segmentos caulinares após oito meses do início do experimento como um grupo (DCCR) e o outro dado pelos dados otimizados (DCCR ótimo). Mediante isso, elaborou-se um script no software R para obtenção dos resultados.

3. RESULTADOS

3.1. Redundância das variáveis observadas nos delineamentos DCCR e DCCR ótimo

Com o propósito de corroborar com a redundância das variáveis observadas nos delineamentos DCCR e DCCR ótimo, seguindo o procedimento metodológico, que contempla as variações “entre” e “dentre” os níveis dos fatores, aplicou-se a correlação canônica, cujos resultados são dados a seguir na Tabela 2.

Tabela 2. Coeficientes do primeiro par de variáveis canônicas (U_1, V_1) e estimativa de sua correlação.

Variáveis (DCCR)	U_1	Variáveis (DCCR _{opt})	V_1
Substrato	-0,0171	Substrato _{opt}	0,0111
Sacarose	-0,1667	Sacarose _{opt}	-0,2184
Tiametoxam	0,1286	Tiametoxam _{opt}	0,7852
Peso raiz	-3,3856	Peso raiz _{opt}	-0,7717
Peso parte aérea	1,6310	Peso parte aérea _{opt}	1,2478

$$\text{Correlação canônica } (U_1, V_1) = \rho_1 = 0,778$$

em que: DCCR_{opt} se trata do DCCR ótimo e Substrato_{opt}, Sacarose_{opt}, Tiametoxam_{opt}, Peso raiz_{opt} e Peso parte aérea_{opt} correspondem as variáveis ótimas.

Os resultados descritos na Tabela 2, correspondem aos coeficientes das variáveis, que representam o primeiro par canônico (U_1, V_1). Para este par, a correlação canônica estimada foi 0,778. Embora seja não significativo, ressalta-se que o interesse maior está nos escores das variáveis canônicas (U_1, V_1) e na análise da redundância, evidenciada na Tabela 3.

Tabela 3. Porcentagem do índice de redundância dos grupos de variáveis dependentes observadas nos delineamentos DCCR e DCCR ótimo explicadas ao primeiro par canônico (U_1, V_1).

Índice de redundância	Estimativa (%)
DCCR DCCR _{opt}	22,08
DCCR _{opt} DCCR	19,43

Para fins de comparação a redundância da variabilidade explicada pelos pares de variáveis canônicas, segue ilustrada na Figura 1.

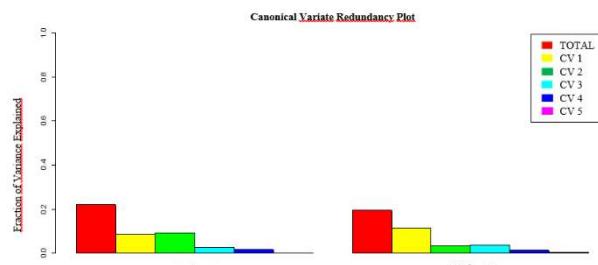


Figura 1. Análise da redundância para os pares de variáveis canônicas.

Figure 1. Redundancy analysis for pairs of canonical variables.

Com a confirmação da baixa redundância das variáveis respostas em relação ao primeiro par das variáveis canônicas (U_1, V_1), procedeu-se com o procedimento de otimização considerando os escores gerados pelo mesmo par.

A fim de comparação, considerou-se o modelo linear para o subdivisível em blocos, considerando os delineamentos DCCR e DCCR ótimo, dispostos em blocos. Os resultados encontram-se descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Estimativas dos parâmetros do modelo linear considerando o delineamento subdivisíveis em blocos.

Table 4. Estimates of the linear model parameters considering the subdivisible block design.

Parâmetros	Estimativas
Bloco 1	-0,000000005
β_1	-0,2816
β_2	-0,6819
β_3	0,2359
Bloco 2	-0,0391
β_1	0,1179
β_2	-0,7827
β_3	0,7223
SQres	0,3143
R ²	0,6774

Os resultados descritos na Tabela 4 evidenciam que, ao ajustar o modelo de regressão linear para os escores da primeira variável canônica (U_1, V_1) por meio do R², percebeu-se uma proximidade com a correlação canônica detectada em ρ_1 . Tal fato já era esperado. Contudo, destaca-se que no modelo considera-se a estrutura do delineamento ainda

sendo não ortogonal, conforme pode-se observado na matriz de informação (7).

$$X'X = \begin{pmatrix} 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 13,645 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 13,645 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 13,645 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 20,000 & 0,000 & -1,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 16,000 & 0,000 & -1,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -1 & 0,000 & 15,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -1,000 & 0,000 & 16,000 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Em se tratando de otimização, naturalmente inclui termos quadráticos por caracterizar modelo com curvatura, sendo propício a estimar respostas de máximos e mínimos. Logo, a fim de comparação modelos quadráticos foram ajustados, considerando os delineamentos sem a blocagem, isto é, individuais e com a subdivisão em blocos. As estimativas dos parâmetros, encontram-se descritas na Tabela 5.

Os resultados descritos na Tabela 5, correspondem as estimativas dos modelos quadráticos, individuais a cada delineamento, DCCR e DCCR ótimo e considerando a análise conjunta com blocos diagonais.

Seguindo estas especificações, de forma comparativa, nota-se que o ajuste para o DCCR resultou em autovalores positivos, o que permite inferir que o modelo apresenta um ponto estacionário classificado como ponto de mínimo.

Em se tratando dos demais delineamentos, pode-se observar por meio dos resultados dos autovalores, dos quais, os sinais oscilaram entre positivo e negativo. Assim sendo, houve evidências estatísticas de que o ponto estacionário seja classificado como ponto de sela ou *outlier*. Portanto, justifica-se a implementação da análise *ridge*, cujos resultados são dados a seguir na Tabela 6.

Tabela 5. Estimativas dos parâmetros do modelo quadrático.

Table 5. Estimates of the quadratic model parameters.

Parâmetros	Modelo DCCR	Modelo DCCR _{opt}	Sub-Bloco (Bloco 1)	Sub-Bloco (Bloco 2)
β_0	-0,1638	0,1214	*-0,1638	0,1214
$\beta_1 (x_1)$	-0,2816	0,1237	-0,2816	0,1237
$\beta_2 (x_2)$	-0,6819	-0,7709	-0,6819	-0,7709
$\beta_3 (x_3)$	0,2359	0,7154	0,2359	0,7154
$\beta_{11} (x_1^2)$	0,0963	-0,1149	0,0963	-0,1149
$\beta_{22} (x_2^2)$	0,0251	0,0149	0,0251	0,0149
$\beta_{33} (x_3^2)$	0,1186	-0,0989	0,1186	-0,0989
Autovalores	$\lambda_1 = 0,1186$ $\lambda_2 = 0,0963$ $\lambda_3 = 0,0251$	$\lambda_{1\text{opt}} = 0,0149$ $\lambda_{2\text{opt}} = -0,0989$ $\lambda_{3\text{opt}} = -0,1149$	$\lambda_{1\text{sub}} = 0,118;$ $\lambda_{2\text{sub}} = 0,096;$ $\lambda_{3\text{sub}} = 0,025$	$\lambda_{4\text{sub}} = 0,014;$ $\lambda_{5\text{sub}} = -0,098;$ $\lambda_{6\text{sub}} = -0,114$

em que: * (intercepto) representa a estimativa dos blocos, x_1 os níveis codificados para a variável substrato, x_2 os níveis codificados para a variável sacarose e x_3 os níveis codificados para a variável tiametoxam.

Tabela 6. Resultados ótimos obtidos pela análise *ridge* para cada delineamento, em função dos objetivos máximos e mínimos.

Table 6. Optimal results were obtained by the ridge analysis for each design, depending on the maximum and minimum objectives.

Delineamento	Objetivo	Substrato	Sacarose	Tiametoxam	Valores Preditos escores (U_1, V_1)
DCCR (original)	Máximo	-	-	-	
Análise ridge					
DCCR (ótimo)	Máximo	53,5523	3,0285	2,5967	0,8581
	Mínimo	46,2035	9,9929	1,0069	-0,43411
DCCR subdivisível em blocos	Máximo	33,1919	3,0064	2,3859	1,1895
	Mínimo	60,2646	11,7902	1,4964	-1,9420

Por meio dos resultados, descritos na Tabela 6, ao considerar o DCCR original, cujo delineamento não envolve subdivisão em blocos, inferiu-se de forma exata que a combinação dos níveis dos fatores resultou em um escore para o primeiro par de variável canônica (U_1, V_1), um escore predito mínimo de -5,115, o que denota um valor incoerente, em relação a magnitude dos escores, compreendida em um intervalo de [-1,928; 1,971].

4. DISCUSSÃO

Os resultados descritos na Tabela 3 mostram que o uso do delineamento composto central otimizado, em termos de perda de informação da variabilidade explicada pelo conjunto de variáveis independentes que formam a primeira variável canônica V_1 é igual a 22,08%.

De forma análoga, a porcentagem da redundância do conjunto de variáveis observados no $DCCR_{opt}$ em relação a segunda variável canônica, foi estimada em 19,43%. O valor aproximado entre as duas redundâncias explica que, em termos da redução de dimensão, os escores da primeira ou segunda variável canônica podem substituir a modelagem multivariada considerando os escores na identificação e inferência sobre os tratamentos.

Quanto a matriz de delineamento subdivisíveis em blocos dada em (5) sendo não ortogonal, ressalta-se que isso não impede que o método de mínimos quadrados seja utilizado, desde que, considere no processo de estimação o produto de kronecker, justamente por considerar os produtos cruzados entre os blocos da matriz particionada.

Chama-se também a atenção de que a redução de dimensão em dados experimentais não é recomendável a utilização de componentes principais, mas sim, escores das variáveis canônicas, cuja fundamentação teórica envolve maximização de pares de formas quadráticas correspondentes a variação entre níveis dos fatores, evidentemente, cada fator, por ser uma variável independente, poderá ser considerado bloco.

E em se tratando dos delineamentos DCCR ótimo e DCCR subdivisível em blocos apresentados na Tabela 6, o qual contempla na blocagem o delineamento DCCR original, para a resposta de máximo percebeu-se que não houve diferenças discrepantes entre os níveis de sacarose e tiametoxam. Contudo, pode-se verificar que o nível de substrato foi reduzido, com valor a um nível de 33,19 % de fibra de coco no substrato com casca de pinus. Porém, analisando a resposta mínima, percebeu-se um aumento expressivo nos níveis de substrato.

Uma possível explicação em termos práticos em relação a essa sensibilidade do fator substrato pode ser atribuída no fato de que a escolha do substrato foi justamente por se tratar de um fator muito sensível para o enraizamento de um segmento caulinar de um *Coffea arabica*. O qual refletiu diretamente nas variáveis peso raiz e peso parte aérea.

Em relação ao fator sacarose como o seu objetivo é fornecer energia para o desenvolvimento do enraizamento e o tiametoxam se trata de um inseticida que tem o efeito fisióativador, o qual estimula algumas rotas metabólicas na planta que vai refletir numa ativação fisiológica, o que em campo promove maior enraizamento. Ambos, não se mostraram tão sensíveis em relação ao enraizamento quanto o substrato, considerado um fator muito importante em relação ao enraizamento de um segmento caulinar.

A seleção do delineamento em relação aos resultados obtidos quanto as recomendações do ótimo e do subdivisível em blocos do ponto de vista numérico, apesar da discrepância do substrato, independe visto que no geral os resultados foram bem próximos.

Contudo, partindo do pressuposto que a análise em blocos é mais informativa porque considera um efeito a mais, torna-se mais interessante considerá-la, visto que na prática o estudo consiste em maximizar ou minimizar a resposta. Como no caso do peso da raiz e peso da parte aérea o uso dos escores consiste justamente para a obtenção de uma conclusão conjunta dessas variáveis, que maximize alguma informação retratada em todas as variáveis simultaneamente.

5. CONCLUSÕES

Assim, recomenda-se a blocagem nos delineamentos DCCR na abordagem original e otimizada, a ser considerada em um único delineamento, nomeado como subdivisível em blocos, no qual, dado a análise ridge evidenciou que os níveis do fator substrato são mais sensíveis a otimização dos escores preditos obtidos no primeiro par de variáveis canônicas (U_1, V_1).

Por fim, deve ser levado em consideração também a disponibilidade de materiais do pesquisador, como o fator substrato, o qual apresentou uma diferença mais discrepante nos dois casos.

6. REFERÊNCIAS

- ASEFA, G.; MOHAMMED, H.; AYANO, A. Hybrid vigour study of yield and yield related characters on limmu coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes at South-Western Ethiopia. *Journal of Tropical Crop Science*, v. 8, n. 2, p. 89-100, 2021. <https://doi.org/10.29244/jtcs.8.02.89-100>
- CECAFE_Conselho dos Exportadores de Café do Brasil. **Exportações Brasileiras de Café:** Exportação de café. São Paulo: Conselho dos Exportadores de Café do Brasil, 2023. Disponível em: <<https://www.cecafe.com.br/dados-estatisticos/exportacoes-brasileiras/>>. Acesso em: 27 jul. 2023.
- CONAB_Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café.** Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, maio 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/47548_53fa2722364e222598e51dcb5f8f0ede>.
- EZE, F. C.; NGONADI, L. Alphabetic optimality criteria for 2 K central composite design. *Academic Journal of Applied Mathematical Sciences*, v. 4, n. 9, p. 107-118, 2018.
- FEDOROV, V. V. **Theory of optimal experiments.** Academic Press, 1972.
- GENETI, D. Progress of coffee (*Coffea arabica* L.) hybridization development study in Ethiopia: A review. *Food Science and Quality Management*, v. 92, p. 22-28, 2019. <https://doi.org/10.7176/FSQM/92-03>
- JESUS, A. M. S.; CARVALHO, S. P. de; CASTRO, E. M. de; GOMES, C. N. Observações anatômicas em plantas de *Coffea arabica* L. obtidas por enraizamento de estacas. *Revista Ceres*, v. 57, p. 175-180, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000200006>

- LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. **Análise de dados multivariados**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 475p.
- MEDEIROS, A. C.; CAIXETA, E. T.; OLIVEIRA, A. C. B. de; SOUSA, T. V.; STOCK, V. de M.; CRUZ, C. D.; ZAMBOLIM, L.; PEREIRA, A. A. Combining ability and molecular marker approach identified genetic resources to improve agronomic performance in *Coffea arabica* Breeding. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, e705278, 2021. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.705278>
- MERGA, D.; BEKSISA, L.; ALEMAYEHU, D.; TEFERA, F.; ADISU, M.; BENTI, T.; AYANO, A.; GIDDISA, G.; KIDANE, M.; ZAKIR, M. Genetic gain trend in yield and advanced selection of yayo coffee (*Coffea arabica* L.) land race collection. **Advances in Agriculture**, v. 2022, e8322180, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8322180>
- MOREIRA, P. C.; MOREIRA, G. C.; CASTRO, N. R.; SILVA, R. P. da. Produtividade e economia de fatores de produção na cafeicultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, n. 2, p. 1-16, 2019.
- REZENDE, T. T.; BALIZA, D. P.; OLVIEIRA, D. H. de; CARVALHO, S. P. de; ÁVILA, F. W.; DOS PASSOS, A. M. A.; GUIMARÃES, R. J. Types of stem cuttings and environments on the growth of coffee stem shoots. **Scientia Agraria**, v. 11, n. 5, p. 387-391, 2010. <https://doi.org/10.5380/rsa.v11i5.20225>
- REZENDE, T. T.; CARVALHO, S. P. de; BUENO FILHO, J. S. de S.; HONDA FILHO, C. P.; SIMÕES, L. de C.; PAULINO, R. N. L.; OLIVEIRA, L. L.; NASCIMENTO, T. L. C. Vegetative propagation of coffee by mini-cutting. **Coffee Science**, v. 12, n. 1, p. 91-99, 2017.
- RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Experimental design and process optimization**. London: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 336p.
- SAKIYAMA, N. S.; PICOLI, E. A. de T.; OLIVEIRA, A. C. B. de; CAIXETA, E. T.; ZAMBOLIM, L.; MARTINEZ, H. E. P.; PEREIRA, A. A. Triple plagiotropic branch in coffee: a new promising mutant?. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 17, p. 408-411, 2017. <https://doi.org/10.1590/1984-70332017v17n4n61>
- SETOTAW, T. A.; CAIXETA, E. T.; PEREIRA, A. A.; OLIVEIRA, A. C. B. de; CRUZ, C. D.; ZAMBOLIM, E. M.; ZAMBOLIM, L.; SAKIYAMA, N. S. Coefficient of Parentage in *Coffea arabica* L. Cultivars Grown in Brazil. **Crop Science**, v. 53, n. 4, p. 1237-1247, 2013. <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.09.0541>
- SMUCKER, B.; KRZYWINSKI, M.; ALTMAN, N. Optimal experimental design. **Nature Methods**, v. 15, n. 8, p. 559-560, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41592-018-0083-2>
- USDA, United States Department of Agriculture. **Coffee: world markets and trade: USDA Foreign Agricultural Service**. Washington: United States Department of Agriculture, jun. 2023. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2023.
- YUNJU, I.; HEYIN, G.; JAE, K. Y. High-throughput data dimension reduction via seeded canonical correlation analysis. **Journal of Chemometrics**, v. 29, p. 193-199, 2015. <https://doi.org/10.1002/cem.2691>

Agradecimentos: Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de pesquisa.

Contribuição dos autores: H.A.F.: metodologia, investigação ou coleta de dados, análise estatística, redação (original), redação (revisão e edição); T.T.R.: investigação ou coleta de dados, redação (original); M.A.C.: conceitualização, metodologia, análise estatística, administração ou supervisão, redação (original), redação (revisão e edição).

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), através de bolsa de estudos para o primeiro autor.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente via e-mail.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses.