

Correlação Canônica e efeito direto e indireto na seleção de acessos de batata-doce coletados no Vale do Ribeira

Canonical correlation and direct and indirect effect on the selection of sweet potato accessions collected in Vale do Ribeira

Correlación canónica y efecto directo e indirecto en la selección de accesiones de boniato colectadas en el Vale do Ribeira

Recebido: 12/07/2022 | Revisado: 20/08/2022 | Aceito: 22/08/2022 | Publicado: 30/08/2022

Beatriz Garcia Lopes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2605-6443>
Universidade de São Paulo, Brasil
E-mail: beatrizgl@usp.br

Maria Eduarda Facioli Otoni

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7288-0508>
Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Brasil
E-mail: eduarda.otoboni@unesp.br

Pablo Forlan Vargas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5718-6403>
Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Brasil
E-mail: pablo.vargas@unesp.br

Bruno Ettore Pavan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6487-5135>
Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Brasil
E-mail: be.pavan@unesp.br

Darllan Junior Luiz Santos Ferreira de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0930-7709>
Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Brasil
E-mail: darllan.oliveira@unesp.br

Resumo

A batata-doce é uma importante hortaliça no Brasil e no mundo, devido a sua capacidade produtiva e qualidade nutricional de suas raízes. Apesar dessa importância, poucos são os programas de melhoramento que visam o desenvolvimento de novas cultivares. Para tanto, é de suma importância conhecer informações sobre a natureza e a magnitude das variações fenotípicas observadas em uma população de plantas. Assim sendo, objetivou-se avaliar as correlações canônicas entre caracteres produtivos, bem como os efeitos diretos e indiretos de acessos de batata-doce coletados em comunidades tradicionais do Vale do Ribeira. O delineamento foi em blocos casualizados, com 95 acessos (tratamento) e duas cultivares comerciais, Brazlândia Branca e Brazlândia Roxa, totalizando assim, 97 acessos com três repetições. Foram avaliados: produtividade total e comercial de raízes, percentagem de produtividade comercial, teor de massa seca de raízes, produtividade total de massa seca das raízes, produtividade de ramas frescas, percentagem de matéria seca nas ramas, produtividade de massa seca das ramas. Cada característica foi submetida à análise de variância, análise de trilha e as correlações canônicas foram feitas entre o grupo de variáveis. Após análise dos resultados, conclui-se que os caracteres Produção total de ramas e Massa seca das ramas não demonstraram importância no estudo devido seus efeitos diretos sob a variável principal serem baixos. A correlação canônica mostrou que não houve associação entre as variáveis avaliadas.

Palavras-chave: *Ipomoea batatas*; Melhoramento genético; Eficiência de utilização.

Abstract

Sweet potato is an important vegetable in Brazil and in the world, due to its productive capacity and nutritional quality of its roots. Despite this importance, there are few breeding programs aimed at the development of new cultivars. Therefore, it is extremely important to know information about the nature and magnitude of phenotypic variations observed in a plant population. Therefore, the objective was to evaluate the canonical correlations between productive characters, as well as the direct and indirect effects of sweet potato accessions collected in traditional communities in Vale do Ribeira. The design was in randomized blocks, with 95 accessions (treatment) and two commercial cultivars, Brazlândia Branca and Brazlândia Roxa, thus totaling 97 accessions with three replications. The following were evaluated: total and commercial productivity of roots, percentage of commercial products, the content of dry mass of roots, the total productivity of dry mass of roots, productivity of fresh vines, percentage of dry matter in the vines,

productivity of dry mass of the vines. Each characteristic was submitted to analysis of variance, trail analysis, and canonical correlations were made between the group of variables. After analyzing the results, it is concluded that the character's Total production of vines and Dry mass of vines did not show importance in the study because their direct effects on the main variable are low. The canonical correlation showed that there was no association between the variables evaluated.

Keywords: *Ipomoea batatas*; Genetic improvement; Utilization efficiency.

Resumen

La batata es una hortaliza importante en Brasil y en el mundo, por la capacidad productiva y la calidad nutricional de sus raíces. A pesar de esta importancia, existen pocos programas de mejoramiento dirigidos al desarrollo de nuevos cultivares. Por lo tanto, es sumamente importante conocer información sobre la naturaleza y magnitud de las variaciones fenotípicas observadas en una población de plantas. En consecuencia, el objetivo fue evaluar las correlaciones canónicas entre los caracteres productivos, así como los efectos directos e indirectos de las accesiones de camote colectadas en las comunidades tradicionales del Vale do Ribeira. El diseño fue en bloques al azar, con 95 accesiones (tratamiento) y dos cultivares comerciales, Brazlândia Branca y Brazlândia Roxa, totalizando así 97 accesiones con tres repeticiones. Se evaluaron: productividad total y comercial de raíces, porcentaje de productividad comercial, contenido de masa seca de raíces, productividad total de masa seca de raíces, productividad de vid fresca, porcentaje de materia seca en las vides, productividad de masa seca de las vides. Cada característica se sometió a análisis de varianza, análisis de rastros y se realizaron correlaciones canónicas entre el grupo de variables. Luego de analizar los resultados, se concluye que los caracteres Producción total de vid y Masa seca de vid no mostraron importancia en el estudio debido a que sus efectos directos sobre la variable principal son bajos. La correlación canónica mostró que no hubo asociación entre las variables evaluadas.

Palabras clave: *Ipomoea batatas*; Mejora genética; Eficiencia de utilización.

1. Introdução

A batata-doce (*Ipomoea batatas*) é uma cultura que, devido a facilidade em seu cultivo (por ser uma cultura de fácil reprodução), apresenta destaque entre as hortaliças, além de demonstrar ampla adaptação a diferentes tipos de solo e clima, tolerância à seca e baixo custo de produção (Andrade Junior et al., 2012), possibilitando seu cultivo em todo território nacional.

É a quarta hortaliza mais consumida no Brasil destacando-se das demais por apresentar alto rendimento por área (Oliveira et al., 2005), sendo colhido em 2018, 741,2 toneladas de batata-doce em área plantada de 52.950 hectares (Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística - IBGE, 2020).

Os programas de melhoramento genético visam realizar a seleção de genótipos que apresentem superioridade aos demais, prática esta que deve ser feita de forma mais eficiente possível, podendo lançar mão de ferramentas biométricas e multivariadas para garantir a eficiência na seleção. Logo, o uso de cultivares melhoradas propiciam aumentos consideráveis em produção no setor agrícola, sendo os programas de melhoramento genético um dos pilares das altas produtividades na agricultura brasileira (Vargas et al., 2018).

Para que a seleção ocorra de forma eficiente, informações sobre a natureza e a magnitude das variações fenotípicas observadas em uma população são necessárias, bem como as correlações de outras características, ou até sobre a extensão da influência ambiental na expressão das características estudadas (Gomes et al., 2007). A correlação entre caracteres é um parâmetro importante, visto que possibilita aos melhoristas conhecer as modificações existentes em um determinado caráter em função da seleção praticada em outro correlacionado a ele (Borém et al., 2021). Ainda, a análise de trilha possibilita entender as causas envolvidas nas associações entre caracteres, decompondo a correlação existente em efeitos diretos e indiretos através de uma variável principal e as variáveis secundárias (Salla et al., 2015).

Dentre as análises multivariadas tem-se as correlações canônicas, que segundo Albuquerque Moura et al. (2020), possibilita obter ganhos ainda maiores que a seleção simultânea já que não se limita à análise de apenas duas características e permite a seleção de grupos de características. As correlações canônicas permitem agrupar variáveis de interesse possibilitando a seleção indireta de caracteres através da determinação das associações entre os grupos (Cruz et al., 2012), fornecendo assim, informações valiosas para a seleção de características desejáveis nos programas de melhoramento (Carvalho et al., 2015).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar as correlações canônicas entre caracteres produtivos, bem como os efeitos diretos e indiretos de acessos de batata-doce coletados em comunidades tradicionais do Vale do Ribeira.

2. Metodologia

A coleta dos acessos foi realizada em comunidades tradicionais do Vale do Ribeira, sendo essas, quilombos, aldeias indígenas e comunidades caiçaras. Também foram coletados acessos em hortas periurbanas onde se cultivava batata-doce para subsistência e em pequenos agricultores, no período de fevereiro à novembro de 2013.

No total, foram coletados 95 acessos de batata-doce entre sete municípios do Vale do Ribeira. Após a coleta e identificação do material, os mesmos foram levados à UNESP Câmpus de Registro. A avaliação em campo dos acessos, foi realizada na Fazenda Experimental da UNESP, no município de Registro-SP, entre fevereiro e agosto de 2014.

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, utilizando os 95 acessos e adicionando como testemunhas duas cultivares comerciais, Brazlândia Branca e Brazlândia Roxa, totalizando assim, 97 acessos com três repetições. A parcela experimental foi composta por 10 plantas em fileira única, sendo a área útil da parcela as oito centrais.

As mudas contendo oito entrenós foram transplantadas para o campo no espaçamento entrelinhas de 1m e entre plantas de 0,25 cm, totalizando 40 mil plantas por hectare. O preparo do solo, assim como as práticas de manejo e adubação foram realizadas conforme recomendação para a cultura.

A colheita foi realizada 5 meses após o plantio, sendo avaliados os seguintes caracteres: Produtividade de raiz (PR): massa de todas as raízes colhidas na parcela e posteriormente convertidas para kg ha⁻¹; Produtividade comercial de raízes (PCR): massa das raízes, com massa acima de 80 g, na parcela e posteriormente convertidas para kg ha⁻¹; Percentagem de produtividade comercial de raízes (%PC): obtido através da equação: %PC = (PCR / PTR) x 100; Teor de massa seca nas raízes (TMSR): amostras de 2 kg de raízes foram secas em estufa a 65°C, até atingiram massa constante para determinação do teor de matéria seca (%); Produtividade de massa seca das raízes (PMSR): obtido através da equação: PMSR = PT x TMSR; Produtividade de ramas frescas (PRmF): obtidas por meio do corte ao nível do solo das ramas e folhas, posterior pesagem da parcela e convertidas para kg ha⁻¹; Teor de matéria seca nas ramas (TMSRm): amostras de 2 kg da parte aérea foram trituradas, em seguida foram colocadas em estufa a 65°C, até atingir massa constante para determinação do teor de matéria seca (%); Produtividade de matéria seca nas ramas (PMSRm): obtido por meio da equação: PMSRm= PRF x TMSRm.

Para as aferições foram utilizados, de acordo com a necessidade, balança eletrônica digital marca Toledo, modelo 9094C/5 com capacidade para 15 kg ± 5 g e balança eletrônica semi-analítica marca Shimadzu, modelo BL3200 com capacidade para 3.200 g ± 0,01 g.

Cada característica foi submetida à análise de variância adotando-se o modelo estatístico $Y_{ij} = \mu + G_i + B_j + e_{ij}$ em que Y_{ij} é o valor observado no i-ésimo clone do j-ésimo bloco (j=1, 2, 3); μ é a média geral do experimento; e e_{ij} é o erro experimental associado à observação Y_{ij} .

Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de trilha, proposta por Wright (1921), que segundo Cruz et al. (2012) consistem no estudo dos efeitos diretos e indiretos das características em uma variável básica, em que as estimativas são obtidas através de equações de regressão, onde as variáveis são previamente padronizadas.

A padronização de variáveis é dada por (Cruz et al., 2012):

$$u_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\hat{\sigma}_x} \quad (1)$$

Em que, u_i é a padronização de uma variável; X_i é o desvio de cada observação; \bar{X} média das observações; $\hat{\sigma}_x$ desvio padrão das amostras.

A estimação dos coeficientes de trilha (efeitos diretos e indiretos) é dada pelo modelo:

$$Y - \bar{Y} = b_{o1}(X_1 - \bar{X}_1) + b_{o2}(X_2 - \bar{X}_2) + b_{o3}(X_3 - \bar{X}_3) + \varepsilon \quad (2)$$

Após a análise de trilha, as correlações canônicas, proposta por Hotelling (1936), foram feitas entre o grupo de variáveis: Produção total de raiz (PTR), Produção comercial de raiz (PCR), Porcentagem de produção comercial (%PC), Porcentagem de massa seca da raiz (%MSR), Massa seca da raiz (MSR), Produção total de ramas (PTRA), Produção total de massa seca de ramas (PTMSR), Porcentagem de massa seca de ramas (%MSRA).

A estimação da correlação canônica e dos pares canônicos, sendo a existência de dois grupos de variáveis X e Y, são definidos por:

$X' = [x_1 x_2 \dots x_p]$ = vetor das medidas de p variáveis que constituem o grupo I e,

$Y' = [y_1 y_2 \dots y_q]$ = vetor das medidas de q variáveis que constituem o grupo II

O problema estatístico consiste em estimar a máxima correlação entre combinações lineares de caracteres do grupo I e II, e estimar os respectivos coeficientes de ponderação dos caracteres em cada combinação linear. Sendo X_1 e Y_1 uma das combinações lineares dos caracteres dos grupos I e II, respectivamente, tem-se: (Cruz et al., 2012).

$$X_1 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_p x_p \quad \text{e} \quad Y_1 = a_1 y_1 + a_2 y_2 + \dots + a_p y_p$$

Em que: $a' = [a_1 a_2 \dots a_p]$ = vetor $1 \times p$ de pesos das variáveis do grupo I e $b' = [b_1 b_2 \dots b_p]$ = vetor $1 \times p$ de pesos das variáveis do grupo II.

Define-se como a primeira correlação canônica aquela que maximiza a relação entre X_1 e Y_1 . As funções X_1 e Y_1 constituem o primeiro par canônico associado àquela correlação canônica, que é expressa por:

$$r_1 = \frac{C \hat{\sigma}v(X_1, Y_1)}{\sqrt{\hat{V}(X_1) \hat{V}(Y_1)}} \quad (3)$$

Sendo, $C \hat{\sigma}v(X_1, Y_1) = a' S_{12} b$, $\hat{V}(X_1) = a' S_{11} a$ e $\hat{V}(Y_1) = b' S_{22} b$

Em que, S_{11} : matriz $p \times p$ de covariâncias entre as variáveis do grupo I; S_{22} : matriz $q \times q$ de covariâncias entre as variáveis do grupo II e S_{12} : matriz $p \times q$ de covariâncias entre as variáveis do grupo I e II.

Para os casos em que se utilizam variáveis padronizadas, tem-se $S_{11} = R_{11}$, $S_{22} = R_{22}$ e $S_{12} = R_{12}$, em que R representa uma matriz de correlações.

Morrisson (1978), estima os vetores a e b que são obtidos pela maximização da função r^2 , sujeita à restrição de que $a' S_{11} a = b' S_{22} b = 1$. Tais restrições são necessárias pois promovem estimadores únicos de a e b e indicam que cada combinação linear tem variância igual a 1. Portanto, o problema é estimar a e b , que maximiza a função: $W = (a' S_{12} b)^2 + \lambda(1 - a' S_{11} a) + \delta(1 - b' S_{22} b)$. Em que λ e δ são multiplicadores de Lagrange.

No caso de variáveis padronizadas, deve-se maximizar a função: $W = (a' R_{12} b)^2 + \lambda(1 - a' R_{11} a) + \delta(1 - b' R_{22} b)$

Da qual resulta em:

$$-\lambda R_{11} a + (a' R_{12} b) R_{12} b = \Phi \quad e; \quad (4)$$

$$(a'R_{12}b)R_{21}a - \delta R_{22}b = \Phi \quad (5)$$

Multiplicando (4) por a' e (5) por b' , demonstra-se que:

$$\lambda = \delta(a'R_{12}b)^2 \quad (6)$$

Sob restrições, a raiz quadrada do multiplicador de Lagrange λ ou δ , mede a máxima correlação entre as combinações lineares das variáveis dos grupos I e II.

A partir de (4) e (5), temos:

$$\lambda a = R_{11}^{-1}R_{12}b(a'R_{12}b) \quad (7)$$

e

$$\delta b = R_{22}^{-1}R_{21}b(a'R_{12}b) \quad (8)$$

Considerando as equações (6), (7) e (8), temos:

$$(R_{22}^{-1}R'_{12}R_{11}^{-1}R_{12} - \lambda I)b = \Phi$$

e

$$(R_{11}^{-1}R_{12}R_{22}^{-1}R'_{12} - \lambda I)a = \Phi$$

Assim, tem-se:

- a) A primeira correlação canônica (r_1) entre a combinação linear das variáveis dos grupos I e II é dada por:

$$r_1 = \sqrt{\lambda_1}$$

Em que λ_1 é o maior autovalor da matriz $R_{11}^{-1}R_{12}R_{22}^{-1}R'_{12}$.

- b) O primeiro par canônico é dado por $X_1 = a'X$ e $Y_1 = b'Y$, em que: a : autovetor associado ao primeiro autovalor de $R_{11}^{-1}R_{12}R_{22}^{-1}R'_{12}$, ou, de maneira equivalente: $a = R_{11}^{-1}R_{12}b$, omitindo-se nesta expressão o escalar $a'R_{12}b/\lambda$. b : autovetor associado ao primeiro autovalor de $R_{22}^{-1}R'_{12}R_{11}^{-1}R_{12}$, ou, de maneira equivalente: $b = R_{22}^{-1}R'_{12}a$, omitindo-se nesta expressão o escalar $a'R_{12}b/\delta$.
- c) As demais correlações canônicas e os pares canônicos são estimados utilizando-se os autovalores e os autovetores das expressões descritas, de ordem correspondente a p ou q -ésima correlação estimada.

A significância da hipótese de que todas as possíveis correlações canônicas são nulas ($H_0: \rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_s = 0, s = \min\{p, q\}$) pode ser avaliada pelo teste χ^2 , que segundo Dunteman (1984), é dado por (Cruz et al., 2012):

$$\chi^2 = -t \log e \left[\prod_{i=1}^s (1 - r_i^2) \right]$$

Em que: $t = n - 0,5(p + q + 3)$ e n = número de observações experimentais.

A estatística está associada a pq graus de liberdade. Se a hipótese é rejeitada, testa-se a hipótese $H_0: \rho_k > 0$ e $\rho_{k+1} = \rho_{k+2} = \dots = \rho_s = 0$ por meio de: $\chi^2 = -t \log e \left[\prod_{i=1}^s (1 - r_i^2) \right]$, que está associada a χ^2 com $(p - k)(q - k)$ graus de liberdade.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa computacional Genes (Cruz, 2013).

3. Resultados e Discussão

Verificou-se que houve diferença significativa entre todas as variáveis analisadas pelo teste F a 1% de probabilidade ($p < 0,01$). O coeficiente de determinação obtido para a análise de trilha foi de 0.9945 e o efeito da variável residual foi 0.0735. Nas estimativas de correlações para as oito características avaliadas, houve variação de -0.0028 a 0.898 (Tabela 1).

A seleção em caracteres secundários não apresenta importância se não houver um relacionamento entre o primeiro e segundo caractere. Evento observado na Tabela 1, onde o coeficiente de correlação entre os caracteres PR e TMSR. PR e PMSRm, %PC e TMSR, %PC e TMSRm, TMSR com PMSR, PRmF e TMSRm, PMSR com PRmF, TMSRm e PMSRm, TMSRA e PRmF e PMSRm confirmou uma correlação fenotípica negativa. O caractere PR demonstrou um nível de associação superior em relação a PCR (0,9948) e PMSR (0,8623), bem como PRmF em relação a TMSRm (0,8980).

Tabela 1. Coeficiente de correlação entre as variáveis explicativas PR, PCR, %PC, TMSR, PMSR, PRmF, TMSRm e PMSR em batata-doce.

Variáveis	PR	PCR	%PC	TMSR	PMSR	PRmF	TMSRm	PMSRm
PR	1,00	0,995	0,542	-0,462	0,862	0,085	0,041	-0,082
PCR		1,00	0,592	0,469	0,855	0,086	0,048	0,652
%PC			1,00	-0,299	0,540	0,083	0,034	-0,104
TMSR				1,00	-0,003	-0,268	-0,174	-0,205
PMSR					1,00	-0,006	-0,020	-0,017
PRmF						1,00	0,898	-0,279
TMSRm							1,00	0,145
PMSRm								1,00
p-valor	0,00							
R ²	0,9945							

PR: Produtividade de raiz (kg/ha); PCR: Produção comercial de raízes (kg/ha); %PC: Porcentagem de produção comercial; TMSR: Teor de massa seca da raiz; PMSR: Massa seca da raiz (Kg/ha); PRmF: Produtividade de ramas (Kg/ha); TMSRm: Teor de massa seca de ramas; PMSR: Produtividade de massa seca de ramas. Significativo a 1% pelo teste F com 291 observações. Fonte: autores.

É importante relatar que a correlação fenotípica estima o nível ou grau de relacionamento entre os caracteres derivados do ambiente e que o efeito genético é o mais importante associado a herdabilidade (Coimbra et al., 2000).

Com o objetivo de verificar a correlação entre os dois grupos de variáveis avaliadas, realizou-se o estudo das correlações canônicas envolvendo caracteres de raiz e ramas (Tabela 2). Os caracteres foram divididos em raiz: PR, PCR e PMSR, e parte aérea/ramas (PRmF e PMSRm). Optou-se por utilizar apenas cinco caracteres, entre os oito avaliados, por serem considerados os de maior importância para o estudo.

O princípio da correlação canônica é desenvolver uma combinação linear, em cada conjunto de variáveis, de modo que ela seja maximizada, não havendo distinção entre variável independente e dependente, apenas dois conjuntos de variáveis, em que se busca a máxima correlação entre ambos (Morrison, 1978). Com isso, de acordo com os dados apresentados na Tabela 2, as correlações lineares foram baixas para os dois grupos, em que nenhum grupo apresentou significância pelo teste de qui-quadrado.; ainda, pelos coeficientes dos dois pares canônicos sugere-se que não há relação entre os acessos de batata-doce.

Tabela 2. Correlações canônicas e pares canônicos.

Variáveis	Par canônico	
	Primeiro	Segundo
MSRA	0.37813	0.92575
PMSRM	0.74689	0.66495
PR	0.53255	-0.02849
PCR	0.49466	0.06387
PMSR	0.07645	-0.26041
χ^2	17.609	3.449
r	0.2194	0.10931
Significância (p)	0.7285 ^{ns}	17.819 ^{ns}
GL	6	2

MSRA: Massa seca das ramas; PTR: Produção total de ramas (Kg/ha); PTR: Produção total de raiz (Kg/ha); PCR: Produção comercial da raiz; MSR: Massa seca da raiz. χ^2 : qui-quadrado calculado; r: correlação canônica; GL: grau de liberdade. ^{ns}: não significativo pelo teste qui-quadrado a 5% de probabilidade. Fonte: autores.

De maneira geral, ficou evidenciado que não houve relação entre os caracteres de produção de ramas e raízes (Tabela 2), portanto, a seleção pode ser realizada buscando acessos produtivos em raízes que apresentem quantidade reduzida de ramas, visando o consumo domiciliar de batata-doce, ou selecionar acessos produtivos em ramas e não tão produtivos em raízes, visando assim, a destinação da parte aérea para a alimentação animal. Pode-se também, selecionar acessos que tenham elevadas produção de ramas e de raízes, conjuntamente. Ambos sentidos de seleção podem ocorrer devido à ausência de relação direta entre os grupos de variáveis (Tabela 2).

Para fins de seleção de acessos de batata-doce para o consumo domiciliar, a produtividade comercial de raiz torna-se a variável principal frente às demais. No presente estudo, a produtividade total de raiz demonstrou o maior efeito direto em relação à produtividade comercial de raiz, com valor de 1,0525, sendo altamente superior à variável residual (0,0735). Produtividade total de raiz foi o único caractere que demonstrou resultado satisfatório sob produtividade comercial de raiz tanto na correlação fenotípica (Tabela 1) quanto nos efeitos fenotípicos e genotípicos diretos. Porcentagem de produtividade comercial de raiz, apesar de pouca diferença, também demonstrou efeito direto acima da variável residual, apresentando valor de 0,0893 (Tabela 3).

Cavalcante et al. (2009) avaliando a análise de trilha em caracteres de rendimento de clones de batata-doce, observaram que o maior efeito direto sobre a produtividade de raízes comerciais vem do diâmetro médio da raiz, seguido do número de raízes comerciais.

Porcentagem de massa seca da raiz (0,0409), porcentagem de massa seca de ramas (0,0443) e produtividade total de ramas (0,0600) demonstraram valores inferiores ao efeito da variável residual (0,0735). Massa seca da raiz e massa seca das ramas demonstraram estimativas negativas com relação a seu efeito direto. Para os efeitos genotípicos, observou-se que não houve diferença significativa entre os efeitos diretos e indiretos, comparados aos efeitos fenotípicos (Tabela 3).

Em trabalho realizado por Silva et al. (2012), o número total de raízes, massa total de raízes e peso específico desempenham maior porcentagem de contribuição entre os acessos de batata-doce estudados, influenciando predominantemente sob as outras variáveis do estudo.

Tabela 3. Efeitos fenotípicos e genotípicos direto, indireto e total das variáveis sobre produção comercial de raiz (PCR) de batata-doce.

Variável	Efeito	Via	Fenotípico PCR	Genotípico
PTR	Direto		1,0525	1,0468
	Indireto	%PC	0,0484	0,0461
		%MSR	-0,0189	-0,0171
		MSR	-0,0865	-0,0779
		PTRA	0,0051	0,0055
		MSRA	-0,0022	-0,0023
		%MSRA	-0,0036	-0,0039
	Total		0,9948	0,9954
%PC	Direto		0,0893	0,0833
	Indireto	PTR	0,5702	0,5786
		%MSR	-0,0122	-0,0114
		MSR	-0,0541	-0,0509
		PTRA	0,0049	0,0056
		MSRA	-0,0018	-0,0020
		%MSRA	-0,0046	-0,0052
	Total		0,5917	0,5980
%MSR	Direto		0,0409	0,0356
	Indireto	PTR	-0,4864	-0,5023
		%PC	-0,0267	-0,0266
		MSR	0,0002	0,0027
		PTRA	-0,0160	-0,0177
		MSRA	0,0094	0,0108
		%MSRA	0,0091	0,0094
	Total		-0,4694	-0,4881
MSR	Direto		-0,1003	-0,9202
	Indireto	PTR	0,9076	0,9060
		%PC	0,0482	0,0461
		%MSR	-0,0001	-0,0010
		PTRA	-0,0003	-0,0004
		MSRA	0,0010	0,0014
		%MSRA	-0,0007	-0,0011
	Total		0,8554	0,8590
PTRA	Direto		0,0600	0,0645
	Indireto	PTR	0,0896	0,0893
		%PC	0,0074	0,0073
		%MSR	-0,0109	-0,0098
		MSR	0,0006	0,0006
		MSRA	-0,0487	-0,0532
		%MSRA	-0,0123	-0,0126
	Total		0,0857	0,0862
MSRA	Direto		-0,0542	-0,0590
	Indireto	PTR	0,0434	0,0442
		%PC	0,0030	0,0029
		%MSR	-0,0071	-0,0066
		MSR	0,0020	0,0022
		PTRA	0,0539	0,0582
		%MSRA	0,0064	0,0064
	Total		0,0475	0,0459
%MSRA	Direto		0,0443	0,0453
	Indireto	PTR	-0,0857	-0,0903

	%PC	-0,0093	-0,0097
	%MSR	0,0084	0,0073
	MSR	0,0017	0,0023
	PTRA	-0,0167	-0,0179
	MSRA	-0,0078	-0,0083
	Total	-0,0652	-0,0714
R ²		0,99	0,99
Valor residual		0,0735	0,0705

PTR: Produção total de raiz (Kg/ha); %PC: Porcentagem de produção comercial; %MSR: Porcentagem de massa seca da raiz; MSR: Massa seca da raiz (Kg/ha); PTRA: Produção total de ramas (Kg/ha); PTMSR: Produção total de massa seca de ramas; %MSRA: Porcentagem de massa seca de ramas. R²: Coeficiente de determinação. Fonte: autores.

Com relação ao efeito total, as variáveis fenotípicas que demonstram maior influência sobre produção comercial de raiz foram produção total da raiz (0,9948) e massa seca da raiz (0,8554). Produção total de ramas e massa seca das ramas não apresentaram resultados satisfatórios, porém não foram negativos, 0,0857 e 0,0475 respectivamente. As variáveis que apresentaram efeitos totais negativos foram: porcentagem de massa seca da raiz (-0,4694) e porcentagem de massa seca das ramas (-0,0652). Observa-se comportamento similar para as variáveis genotípicas em comparação com as fenotípicas (Tabela 3).

Efeitos indiretos altos e negativos ou efeitos diretos altos e positivos podem não oferecer ganhos satisfatórios para a seleção indireta. Nesse sentido, recomenda-se a seleção simultânea de caracteres, desde que, as características apresentem valores de herdabilidade compatíveis, ou seja, valores próximos em comparação aos da variável principal (Coimbra et al., 2004; Cruz et al., 2012). Isso indica que mesmo MSR demonstrando efeito direto negativo (-0,1003 e -0,9202) em PCR (Tabela 3), apresenta bom desempenho quando selecionada indiretamente por PTR (0,9076 e 0,9060), influenciando positivamente na PCR, visto que PTR foi o caractere com maior correlação e influência direta na produtividade comercial de raiz (Tabelas 1 e 3).

Dentro do melhoramento, é importante identificar, entre as variáveis de alta correlação com a variável básica, aquelas de maior efeito direto em sentido favorável à seleção, de tal forma que a resposta correlacionada por meio da seleção indireta seja eficiente (Cruz et al., 2012).

Para Cruz et al. (2012) quando a correlação é igual ou próxima de zero não se pode afirmar que não há correlação entre os caracteres, apenas que não há um relacionamento linear entre os caracteres estudados. Os autores também declaram a importância de se utilizar a técnica de correlação canônica, que auxilia o melhorista com intuito de facilitar o estudo com mais de um caractere dependente, acarretando em maior empenho a estudos que envolvam caracteres de maior herdabilidade.

A utilização das técnicas de análises multivariadas proporciona diversas vantagens. Dentre elas, destaca-se a possibilidade de verificar a importância de cada característica avaliada sobre a variação total disponível entre os genótipos avaliados (Pedrosa et al., 2015).

O uso da correlação canônica é amplamente difundido em trabalhos de melhoramento genético de plantas nas mais diversas culturas, tais como: batata-doce (Miranda et al., 1988), ciriguela (Giles et al., 2016), eucalipto (Protásio et al., 2012), feijão (Coimbra et al., 2000), girassol (Nobre et al., 2018), palma forrageira (Silva et al., 2020), trigo (Carvalho et al., 2015), uva (Cargnin, 2019), soja (Ferreira et al., 2020), algodão (Ramos et al., 2021).

4. Conclusão

Algumas das características avaliadas, PTRA e MSRA, não tiveram importância no estudo devido seus efeitos diretos sob a variável principal serem baixos, por meio de análise de trilha.

A correlação canônica mostrou que não há uma associação entre as variáveis analisadas. A maior associação ocorre entre massa seca de ramas e produtividade total de ramas, porém com correlação muito baixa, o que sugere que os dados não estão associados.

Em estudos futuros, outros métodos podem ser acrescentados e também podem ser realizadas pesquisas com outros acessos de batata-doce.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - Código de Financiamento 001 e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do projeto n° 2012/08763-0.

Referências

- Albuquerque Moura, G. B., de Brito, J. I. B., de Assis, F., de Sousa, S., Cavalcanti, E. P., da Silva, J. L. B., & Nascimento, P. M. O. L. (2020). Identificação de preditores para as chuvas do setor leste do Nordeste do Brasil utilizando análise de correlação canônica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(04), 1463-1482.
- Andrade Júnior, V. C., Viana, D. J. S., Pinto, N. A., Ribeiro, K. G., Pereira, R. C., Neiva, I. P., & Andrade, P. C. D. R. (2012). Características produtivas e qualitativas de ramas e raízes de batata-doce. *Horticultura brasileira*, 30, 584-589.
- Borém, A., Miranda, G. V., & Fritsche-Neto, R. (2021). *Melhoramento de plantas*. Oficina de Textos.
- Cargnin, A. (2019). Canonical correlations among grapevine agronomic and processing characteristics. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 41.
- Carvalho, I. R., Souza, V. Q. D., Nardino, M., Follmann, D. N., Schmidt, D., & Baretta, D. (2015). Correlações canônicas entre caracteres morfológicos e componentes de produção em trigo de duplo propósito. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50, 690-697.
- Cavalcante, J. T., Ferreira, P. V., Soares, L., Borges, V., da Silva, P. P., & da Silva, J. W. (2006). Análise de trilha em caracteres de rendimento de clones de batatadoce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 28(2), 261-266.
- Cavalcante, M., Ferreira, P. V., Paixão, S. L., Costa, J. C., Pereira, R. G., & Madalena, J. A. S. (2009). Potenciais produtivo e genético de clones de batata-doce. *Acta Scientiarum Agronomy* 31, 421-426
- Coimbra, J. L. M., Guidolin, A. F., Carvalho, F. I. F. D., & Azevedo, R. D. (2000). Correlações canônicas: II-Análise do rendimento de grãos de feijão e seus componentes. *Ciência Rural*, 30, 31-35.
- Cruz, C. D., Regazzi, A. J., & Carneiro, P. C. S. (2012). Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético-Volume 1.
- Cruz, C. D. (2013). Genes: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 35, 271-276.
- Duntelman, G. H. (1984). *Introduction to multivariate analysis*. SAGE Publications, Incorporated.
- Ferreira, L. L., Moreira, N. V., Carvalho, I. R., dos Santos, N. S. C., de Sá Fernandes, M., de Azevedo Pereira, A. I., & de Andrade Silva, R. (2020). Espaçamento entre linhas de genótipos de soja: médias, regressões e correlações nos níveis de rendimento. *Research, Society and Development*, 9(9), e952997793-e952997793.
- Giles, J. A. D., Oliari, L. S. O., Rocha, A. C. B., Schmildt, E. R., Silva, W., & França, J. M. (2016). Correlações entre características físicas, químicas e físicoquímicas de frutos de ciriguela. *Revista Agro@ambiente on-line*, 10(1), 30-35.
- Gomes, C. N., Carvalho, S. P. D., Jesus, A. M. S., & Custódio, T. N. (2007). Caracterização morfoagronômica e coeficientes de trilha de caracteres componentes da produção em mandioca. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 42, 1121-1130.
- Hotelling, H. (1936). Relations between two sets variables, *Biometrika*, 28, 321-377.
- IBGE . Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2020). *Tabela 1612 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção da lavoura temporária*. Rio de Janeiro: IBGE. 2020. <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612#resultado>.
- Oliveira, A. P. D., Oliveira, M. R. T. D., Barbosa, J. A., Silva, G. G. D., Nogueira, D. H., Moura, M. F. D., & Braz, M. D. S. S. (2005). Rendimento e qualidade de raízes de batata-doce adubada com níveis de uréia. *Horticultura Brasileira*, 23, 925-928.
- Miranda, J. E. C. D., Cruz, C. D., & Pereira, A. S. (1988). Análise de trilha e divergência genética de cultivares e clones de batata-doce. *Rev. bras. genét.*, 881-92.
- Morrison, D.F. (1978). *Multivariate statistical methods*. McGraw Hill.

- Nobre, D. A. C., Silva, F. C. S., Guimarães, J. F. R., Resende, J. C. F., & Macedo, W. R. (2018). Path analysis and canonical correlation in components of the sunflower performance. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 4(3), 364-369.
- Pedrosa, C. E., Viana, D. J. S., de Andrade Júnior, V. C., Azevedo, A. M., Figueiredo, J. A., Neiva, I. P., & Lemos, V. T. (2015). Divergência genética e importância de caracteres em genótipos de batata-doce visando a produção de silagem. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 10(3), 479-484
- Protásio, T. D. P., Trugilho, P. F., Neves, T. A., & Vieira, C. M. M. (2012). Canonical correlation analysis between characteristics of Eucalyptus wood and charcoal. *Scientia Forestalis*, 40(95), 317-326.
- Ramos, P. N. F., Ferreira, P. A., da Silveira, O. R., & de Souza Maia, J. C. (2021). Influência dos atributos físicos do solo na produção e qualidade do algodão em caroço e fibra. *Research, Society and Development*, 10(14), e328101421970-e328101421970.
- Salla, V. P., Danner, M. A., Citadin, I., Sasso, S. A. Z., Donazzolo, J., & Gil, B. V. (2015). Análise de trilha em caracteres de frutos de jaboticabeira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50, 218-223.
- Silva, A. S., Santos, E. M., Pinto, I. M. Y. P., & Ramos, J. D. F. (2020). Multivariate analysis of forage cactus: canonical correlations on morphoproductive characteristics. *Revista Agrarian*, 13(47), 100-106.
- Silva, G. O., Ponijaleki, R., & Suinaga, F. A. (2012). Divergência genética entre acessos de batata-doce utilizando caracteres fenotípicos de raiz. *Horticultura Brasileira*, 30, 595-599.
- Vargas, P. F., Engelking, E. W., Almeida, L. C. F. D., Ferreira, E. A., & Charlo, H. C. D. O. (2018). Genetic diversity among sweet potato crops cultivated by traditional farmers. *Revista Caatinga*, 31, 779-790.
- Wright, S (1921). Correlation and causation. *Journal of Agricultural Research*, 20, 557-585.