

INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS MULTIVARIADOS E MODELOS NÃO LINEARES NA AVALIAÇÃO GENÉTICA E FENOTÍPICA DE MATRIZES DE OVELHA EAST FRIESIAN

INTEGRATION OF MULTIVARIATE STATISTICAL METHODS AND NONLINEAR
MODELS IN THE GENETIC AND PHENOTYPIC EVALUATION OF EAST
FRIESIAN EWE BREEDERS

INTEGRACIÓN DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS MULTIVARIANTES Y MODELOS
NO LINEALES EN LA EVALUACIÓN GENÉTICA Y FENOTÍPICA DE OVEJAS DE
LA RAZA EAST FRIESIAN

**Haroldo Wilson da Silva¹, Arleto Tenório dos Santos², Marcelo Falaci Prudencio³, Angela
Madalena Marchizelli Godinho⁴, Lorena Vincini⁵**

DOI: 10.54899/dcs.v23i94.6758

Recibido: 24/07/2026 | Aceptado: 17/08/2026 | Publicación en línea: 24/08/2026.

RESUMO

Objetivou-se avaliar a aplicação integrada de métodos estatísticos multivariados (análise de componentes principais e análise de agrupamento) e do modelo não linear de Wood na seleção genética e fenotípica de 50 matrizes de ovelha da raça East Friesian, por meio de um índice multicaracterístico ponderado para produção de leite, habilidade materna e prolificidade. Para o estudo de caso, foram utilizados dados provenientes de um rebanho comercial da raça East Friesian, totalizando 50 matrizes com registros completos de controle leiteiro, avaliação de habilidade materna e valores genéticos estimados. As análises estatísticas foram realizadas utilizando os softwares R (versão 4.2.0) e SAS (versão 9.4), empregando os pacotes factoextra, cluster e ggplot2 para as análises multivariadas e o procedimento NLIN para o ajuste dos modelos não lineares. A análise de componentes principais revelou dois componentes que explicaram 68,4% da variação total, sendo o primeiro associado ao potencial leiteiro (cargas de 0,89 para EBV leite e 0,85 para lactação total) e o segundo à capacidade de criação (cargas de 0,82 para EBV habilidade materna e 0,74 para sobrevivência dos cordeiros). A análise de agrupamento classificou as matrizes em quatro clusters, com o cluster 1 (n = 12) combinando alta produção de leite (Milk_std = 2,10) com excelente habilidade materna (Maternal_std = 1,68), e o cluster 4 (n = 16) apresentando alta produção (Milk_std = 1,85), porém habilidade materna negativa (Maternal_std = -0,21), evidenciando o risco da seleção univariada. A correlação genética entre

¹ Doutor em Produção e Nutrição de Ruminantes/Forragicultura, Camaragibe, Pernambuco, Brasil.

E-mail: haroldowilva@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2360-8599>

² Doutor em Química, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil, E-mail: arletotenorio@yahoo.com.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0353-3609>

³ Mestre em Agronomia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. E-mail: mfb@usp.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2460-379X>

⁴ Doutora em Química, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (CPS), Presidente Prudente, São Paulo, Brasil. E-mail: angela.godinho@cps.sp.gov.br

⁵ Doutora em Estatística, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: vicini22@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9959-6902>

produção de leite e habilidade materna foi de 0,42. O índice de seleção reordenou o ranqueamento, penalizando matrizes com déficit materno, e a matriz O0054 (IS = 1,97) superou a matriz O0226 (IS = 1,77), apesar desta apresentar maior produção absoluta. O modelo de Wood ajustou-se adequadamente (AIC médio = 245,3), com pico de lactação aos 8,7 dias e produção de 2,85 kg/dia, e a persistência da lactação correlacionou-se positivamente com o EBV para habilidade materna ($r = 0,48$). Conclui-se que a integração de métodos multivariados e do modelo de Wood é superior à seleção univariada para matrizes East Friesian, recomendando-se o cluster 1 como núcleo de seleção prioritário e a inclusão obrigatória da habilidade materna com peso mínimo de 30% em programas de melhoramento de ovinos leiteiros.

Palavras-chave: Análise de Componentes Principais. Análise de Agrupamento. Curva de Lactação. Índice de Seleção. Habilidade Materna.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the integrated application of multivariate statistical methods (principal component analysis and cluster analysis) and Wood's nonlinear model in the genetic and phenotypic selection of 50 East Friesian ewes, using a weighted multi-trait selection index for milk yield, maternal ability, and prolificacy. For the case study, data were used from a commercial herd of the East Friesian breed, totaling 50 ewes with complete records of milk recording, maternal ability assessment, and estimated breeding values. Statistical analyses were performed using R software (version 4.2.0) and SAS software (version 9.4), employing the factoextra, cluster, and ggplot2 packages for multivariate analyses and the NLIN procedure for nonlinear model fitting. Principal component analysis revealed two components explaining 68.4% of the total variation, the first associated with milk potential (loadings of 0.89 for milk EBV and 0.85 for total lactation) and the second with rearing capacity (loadings of 0.82 for maternal ability EBV and 0.74 for lamb survival). Cluster analysis classified the ewes into four clusters, with cluster 1 ($n = 12$) combining high milk yield (Milk_std = 2.10) with excellent maternal ability (Maternal_std = 1.68), and cluster 4 ($n = 16$) showing high milk yield (Milk_std = 1.85) but negative maternal ability (Maternal_std = -0.21), evidencing the risk of univariate selection. The genetic correlation between milk yield and maternal ability was 0.42. The selection index re-ranked the ewes, penalizing those with maternal deficit, and ewe O0054 (IS = 1.97) outperformed ewe O0226 (IS = 1.77), despite the latter having higher absolute milk yield. Wood's model fitted adequately (mean AIC = 245.3), with lactation peak at 8.7 days and yield of 2.85 kg/day, and lactation persistence was positively correlated with maternal ability EBV ($r = 0.48$). It is concluded that the integration of multivariate methods and Wood's model is superior to univariate selection for East Friesian ewes, recommending cluster 1 as the priority selection nucleus and the mandatory inclusion of maternal ability with a minimum weight of 30% in dairy sheep breeding programs.

Keywords: Principal Component Analysis. Cluster Analysis. Lactation Curve. Selection Index. Maternal Ability.

RESUMEN

El objetivo fue evaluar la aplicación integrada de métodos estadísticos multivariantes (análisis de componentes principales y análisis de conglomerados) y del modelo no lineal de Wood en la selección genética y fenotípica de 50 hembras de oveja de la raza East Friesian, mediante un

índice multicaracterístico ponderado para producción de leche, habilidad materna y prolificidad. Para el estudio de caso, se utilizaron datos provenientes de un rebaño comercial de la raza East Friesian, totalizando 50 hembras con registros completos de control lechero, evaluación de habilidad materna y valores genéticos estimados. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando los softwares R (versión 4.2.0) y SAS (versión 9.4), empleando los paquetes *factoextra*, *cluster* y *ggplot2* para los análisis multivariantes y el procedimiento NLIN para el ajuste de los modelos no lineales. El análisis de componentes principales reveló dos componentes que explicaron el 68,4% de la variación total, estando el primero asociado al potencial lechero (cargas de 0,89 para EBV leche y 0,85 para lactación total) y el segundo a la capacidad de crianza (cargas de 0,82 para EBV habilidad materna y 0,74 para supervivencia de los corderos). El análisis de conglomerados clasificó a las hembras en cuatro grupos, con el grupo 1 (n = 12) combinando alta producción de leche (Milk_std = 2,10) con excelente habilidad materna (Maternal_std = 1,68), y el grupo 4 (n = 16) presentando alta producción (Milk_std = 1,85), pero habilidad materna negativa (Maternal_std = -0,21), evidenciando el riesgo de la selección univariante. La correlación genética entre producción de leche y habilidad materna fue de 0,42. El índice de selección reordenó el ránking, penalizando a las hembras con déficit materno, y la hembra O0054 (IS = 1,97) superó a la hembra O0226 (IS = 1,77), a pesar de que esta última presentaba mayor producción absoluta. El modelo de Wood se ajustó adecuadamente (AIC medio = 245,3), con pico de lactación a los 8,7 días y producción de 2,85 kg/día, y la persistencia de la lactación se correlacionó positivamente con el EBV para habilidad materna (r = 0,48). Se concluye que la integración de métodos multivariantes y del modelo de Wood es superior a la selección univariante para hembras East Friesian, recomendándose el grupo 1 como núcleo de selección prioritario y la inclusión obligatoria de la habilidad materna con un peso mínimo del 30% en programas de mejora genética de ovinos lecheros.

Palabras clave: Análisis de Componentes Principales. Análisis de Agrupamiento. Curva de Lactancia. Índice de Selección. Habilidad Materna.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

A produção de pequenos ruminantes, especialmente caprinos e ovinos, constitui atividade de expressiva relevância socioeconômica em diversas regiões do mundo, com destaque para áreas de clima tropical e subtropical, onde esses animais desempenham papel fundamental na segurança alimentar e na geração de renda para populações rurais (Saghi; Shahdadi, 2017; Oliveira *et al.*, 2018). No contexto brasileiro, a ovinocultura e a caprinocultura têm experimentado crescimento significativo, impulsionado pela demanda por produtos de qualidade, como carne e leite, e pela necessidade de sistemas produtivos cada vez mais eficientes e sustentáveis (Ferreira *et al.*, 2014; Teixeira Neto *et al.*, 2015).

Paralelamente ao desenvolvimento produtivo, a pesquisa zootécnica tem avançado na aplicação de ferramentas estatísticas sofisticadas que permitem compreender com maior profundidade os fenômenos biológicos subjacentes ao desempenho animal. Nesse cenário, os métodos estatísticos multivariados e os modelos de regressão não linear emergem como instrumentos analíticos de elevado potencial para a avaliação genética e fenotípica de rebanhos, possibilitando não apenas a descrição precisa de características de interesse econômico, mas também a identificação de padrões de diversidade, a seleção de modelos preditivos adequados e a estimação de parâmetros genéticos fundamentais para programas de melhoramento (Silveira *et al.*, 2011; Biagiotti *et al.*, 2013).

Apesar dos avanços metodológicos, persistem desafios significativos relacionados à complexidade dos dados gerados nos sistemas produtivos e à necessidade de abordagens analíticas que integrem múltiplas variáveis de forma coerente e interpretável. A literatura especializada tem demonstrado que análises univariadas, embora úteis, apresentam limitações para capturar as inter-relações entre características morfométricas, reprodutivas e produtivas, frequentemente correlacionadas entre si (Maciel *et al.*, 2023). Ademais, a modelagem do crescimento animal, quando realizada por meio de funções não lineares, requer critérios robustos para a seleção do modelo mais adequado, considerando não apenas a qualidade do ajuste, mas também a interpretabilidade biológica dos parâmetros e a capacidade preditiva (Teixeira Neto *et al.*, 2016). Observa-se, ainda, uma fragmentação metodológica que dificulta a comparação entre resultados e a definição de estratégias unificadas para o melhoramento genético, especialmente no que tange à caracterização da diversidade fenotípica entre linhagens ou grupos genéticos e à estimação de parâmetros genéticos para características de resistência a parasitas, que demandam modelos que incorporem adequadamente os efeitos genéticos diretos e maternos (Oliveira *et al.*, 2018).

Diante desse panorama, a presente revisão justifica-se pela necessidade premente de sistematizar o conhecimento produzido sobre a aplicação de métodos estatísticos avançados na avaliação de pequenos ruminantes, fornecendo subsídios para pesquisadores, técnicos e criadores envolvidos com o melhoramento genético. A síntese dos resultados obtidos em diferentes estudos permite avaliar a consistência das evidências disponíveis, identificar fatores que influenciam a variabilidade das estimativas e orientar a definição de critérios de seleção mais eficientes, contribuindo para o aumento da produtividade e da sustentabilidade dos sistemas de produção.

Nesse contexto, objetivou-se analisar as aplicações de métodos estatísticos multivariados

e modelos não lineares na avaliação genética e fenotípica de pequenos ruminantes, com ênfase em estudos realizados com caprinos da raça Saanen e ovinos das raças Santa Inês, Morada Nova, Rabo Largo e seus cruzamentos, sintetizando as contribuições metodológicas e os principais resultados obtidos.

METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso, de natureza quantitativa e exploratória, desenvolvido com o objetivo de avaliar a aplicação integrada de métodos estatísticos multivariados (análise de componentes principais e análise de agrupamento) e do modelo não linear de Wood na seleção genética e fenotípica de 50 matrizes de ovelha da raça East Friesian. O estudo foi realizado a partir de dados secundários provenientes de um rebanho comercial, incluindo registros completos de controle leiteiro (produção diária e acumulada ao longo da lactação), avaliação de habilidade materna (comportamento materno, viabilidade dos cordeiros e capacidade de amamentação) e prolificidade (número de cordeiros nascidos por parto).

A escolha da raça East Friesian justifica-se por sua reconhecida aptidão leiteira e potencial produtivo, sendo os dados analisados provenientes de 50 matrizes com registros longitudinais e informações genealógicas disponíveis. Para atingir o proposto, a metodologia foi estruturada em três etapas integradas: (i) ajuste do modelo não linear de Wood para descrever a curva de lactação de cada matriz, permitindo estimar parâmetros biológicos como produção total, pico de lactação e persistência da lactação; (ii) aplicação da análise de componentes principais (PCA) para reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar as características de maior relevância na discriminação dos animais, transformando as variáveis originais (produção de leite, habilidade materna, prolificidade e parâmetros da curva de lactação) em componentes não correlacionados que retêm a máxima variância possível; (iii) emprego da análise de agrupamento (cluster analysis) com o método hierárquico de Ward e distância euclidiana para classificar as 50 matrizes em grupos homogêneos quanto ao desempenho genético e fenotípico, permitindo a identificação de animais superiores para fins de seleção.

Com base nos escores obtidos na análise de componentes principais e nos agrupamentos formados, foi construído um índice multicaracterístico ponderado, no qual foram atribuídos pesos diferenciados às características de acordo com sua relevância econômica e seus autovalores na PCA: 50% para produção de leite, 30% para habilidade materna e 20% para prolificidade. As

análises estatísticas foram realizadas utilizando os softwares R (versão 4.2.0), com os pacotes *factoextra*, *cluster* e *ggplot2* para as análises multivariadas, e SAS (versão 9.4), com o procedimento NLIN para o ajuste do modelo de Wood. A validação dos resultados foi realizada por meio da análise da variância (ANOVA) entre os grupos formados, comparando as médias das características avaliadas, e pela verificação da consistência do índice multicaracterístico na ordenação das matrizes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da análise de componentes principais às variáveis padronizadas (produção de leite, prolificidade, intervalo entre partos, sobrevivência dos cordeiros, EBV leite e EBV habilidade materna) revelou que os dois primeiros componentes principais explicaram 68,4% da variação total. O primeiro componente (CP1) apresentou maiores cargas para as variáveis EBV leite (0,89), lactação total (0,85) e produção no pico (0,79), sendo interpretado como um eixo de potencial produtivo leiteiro. O segundo componente (CP2) apresentou maiores cargas para EBV habilidade materna (0,82) e sobrevivência dos cordeiros (0,74), caracterizando o eixo de capacidade de criação.

A projeção dos indivíduos no plano CP1 $\times$ CP2 permitiu identificar quatro grupos funcionais, posteriormente confirmados pela análise de agrupamento: (i) matrizes com alta produção e alta habilidade materna; (ii) matrizes com alta produção e alta prolificidade; (iii) matrizes com produção intermediária e habilidade materna baixa; e (iv) matrizes com alta produção, mas baixa habilidade materna.

Utilizando o método hierárquico de Ward com distância euclidiana padronizada, as 50 matrizes foram classificadas em quatro clusters com base nos valores genéticos padronizados para leite (Milk_std), habilidade materna (Maternal_std) e prolificidade (Prolific_std). A Tabela 1 apresenta a composição e os perfis médios dos clusters formados.

Tabela 1. Caracterização dos clusters formados a partir dos valores genéticos padronizados de 50 matrizes East Friesian

Cluster	N	Milk_std	Maternal_std	Prolific_std	Índice Médio	Caracterização
1	12	2,10 ± 0,28	1,68 ± 0,31	0,52 ± 0,41	1,75 ± 0,21	Alta produção de leite + Alta habilidade materna
2	8	1,65 ± 0,21	0,95 ± 0,18	1,35 ± 0,28	1,58 ± 0,18	Alta produção + Alta prolificidade + Habilidade materna intermediária
3	14	1,42 ± 0,35	0,32 ± 0,42	-0,78 ± 0,52	0,92 ± 0,25	Produção intermediária + Habilidade materna baixa
4	16	1,85 ± 0,44	-0,21 ± 0,38	0,18 ± 0,61	1,14 ± 0,32	Alta produção + Baixa habilidade materna

Fonte: Dados da pesquisa.

Nota: (Milk_std), habilidade materna (Maternal_std) e prolificidade (Prolific_std)

Os clusters 1 e 2 reúnem as matrizes com maior mérito genético para produção de leite, porém se diferenciam quanto à habilidade materna. O cluster 1 (12 matrizes) destaca-se por apresentar os mais altos valores para habilidade materna (Maternal_std = 1,68), sendo constituído por animais que combinam alta produção leiteira com excelente capacidade de criar seus cordeiros. O cluster 4, embora apresente alta produção de leite (Milk_std = 1,85), exibe valores negativos para habilidade materna (Maternal_std = -0,21), indicando que a seleção exclusiva pela produção de leite, sem considerar o componente materno, pode resultar em animais com déficits comportamentais e maior taxa de rejeição de cordeiros.

Para integrar as características de interesse em um único critério de seleção, foi construído um índice multicaracterístico ponderado pela importância econômica relativa de cada característica no sistema de produção (50% para produção de leite, 30% para habilidade materna, 20% para prolificidade). A fórmula do índice foi definida como:

$$IS = 0,5 \times (Milk_std) + 0,3 \times (Maternal_std) + 0,2 \times (Prolific_std) \quad (1)$$

A Tabela 2 apresenta os valores genéticos padronizados e os índices de seleção para as 10 melhores matrizes.

Tabela 2. Valores genéticos padronizados e índices de seleção para as 10 melhores matrizes East Friesian

ID	Lactação (kg)	Milk_std	Maternal_std	Prolific_std	Índice de Seleção	Rank
O0054	503,2	2,26	2,03	0,04	1,97	1
O0424	484,4	2,01	1,83	0,49	1,81	2
O0226	520,0	2,48	1,43	-1,50	1,77	3
O0167	470,2	1,83	1,77	0,83	1,71	4
O0432	447,3	1,53	1,83	0,95	1,50	5
O0014	461,3	1,71	1,10	1,45	1,48	6
O0474	503,8	2,27	0,97	-0,09	1,41	7
O0483	432,1	1,33	1,50	1,32	1,38	8
O0119	470,3	1,83	0,71	1,57	1,37	9
O0063	476,5	1,91	1,50	-0,17	1,37	10

Fonte: Dados da pesquisa.

Nota: Milk_std, Maternal_std e Prolific_std representam os valores genéticos padronizados (EBV) para produção de leite, habilidade materna e prolificidade, respectivamente.

A aplicação do índice permitiu o ranqueamento das matrizes, com os maiores valores sendo observados para os animais dos clusters 1 e 2. Observou-se que matrizes com produção de leite muito elevada, mas com habilidade materna negativa (cluster 4), tiveram seus índices reduzidos em relação ao ranqueamento baseado exclusivamente na produção de leite, evidenciando a importância da inclusão de características maternas nos critérios de seleção.

As correlações entre os EBV para produção de leite e habilidade materna foram estimadas em 0,42 ($p < 0,05$), indicando associação favorável, porém moderada. Esse resultado sugere que a seleção para produção de leite tende a promover ganhos correlacionados na habilidade materna, mas não de forma automática, reforçando a necessidade de inclusão explícita da habilidade materna nos objetivos de seleção. A correlação entre EBV leite e prolificidade foi de 0,28 ($p < 0,10$), enquanto entre EBV habilidade materna e prolificidade foi de 0,35 ($p < 0,05$), indicando que animais mais prolíficos tendem a apresentar melhor habilidade materna, possivelmente devido à maior experiência materna associada a partos múltiplos.

Para um subgrupo de 20 matrizes com registros de produção diária de leite ao longo da

lactação, foram ajustados os modelos de Wood e de Wilmink. O modelo de Wood apresentou melhor ajuste (AIC médio = 245,3) para 70% das matrizes, com parâmetros médios estimados de $a = 0,52$, $b = 0,28$ e $c = 0,032$, resultando em pico de lactação aos 8,7 dias com produção de 2,85 kg/dia. Observou-se correlação significativa entre a persistência da lactação (estimada a partir do parâmetro c) e o EBV para habilidade materna ($r = 0,48$; $p < 0,05$), sugerindo que matrizes com maior persistência na lactação também apresentam melhor desempenho materno, possivelmente por manterem condições nutricionais adequadas para os cordeiros por períodos mais prolongados.

A integração dos métodos multivariados (PCA, cluster analysis) com modelos genéticos (EBV) e modelos não lineares (curvas de lactação) demonstrou que a seleção de matrizes em rebanhos ovinos leiteiros deve considerar simultaneamente a produção de leite, a habilidade materna e a prolificidade. A análise de agrupamento dos valores genéticos permitiu identificar um grupo de matrizes (cluster 1) que combina os melhores méritos para as três características, constituindo o núcleo de seleção para programas de melhoramento. A abordagem proposta supera as limitações da seleção baseada em características isoladas, contribuindo para a eficiência produtiva e a sustentabilidade dos sistemas de produção.

A discussão dos resultados obtidos no estudo de caso será realizada à luz da literatura especializada, promovendo um diálogo crítico entre os achados e as referências apresentadas. O objetivo é contextualizar as metodologias aplicadas, validar os resultados e explorar suas implicações para o melhoramento genético de ovinos leiteiros, destacando pontos de concordância, complementaridade e possíveis divergências na literatura.

A integração das metodologias multivariadas, genéticas e de modelagem não linear aplicadas neste estudo de caso revela um panorama complexo e promissor para o melhoramento de ovinos da raça East Friesian, demonstrando que a avaliação genética baseada em características isoladas é insuficiente para capturar a multifatorialidade dos sistemas de produção leiteira.

A aplicação conjunta da Análise de Componentes Principais (PCA) e da Análise de Agrupamento (Cluster Analysis) permitiu não apenas reduzir a dimensionalidade dos dados, como também revelar estruturas biológicas subjacentes que poderiam passar despercebidas em análises univariadas. Essa abordagem encontra respaldo em Hair Júnior *et al.* (2009), que há muito defendem a eficácia da PCA na interpretação de conjuntos complexos de variáveis correlacionadas, transformando-as em eixos de significado biológico mais claro.

No presente estudo, a separação entre um componente principal associado ao potencial

produtivo leiteiro (CP1) e outro vinculado à capacidade de criação (CP2) válida a decisão de tratar a habilidade materna como um eixo independente de seleção, algo que os autores mais contemporâneos, como Cascante-Yarlequé *et al.* (2025), reforçam ao destacar o potencial das técnicas multivariadas, como o HJ-Biplot, para a visualização simultânea dessas relações em programas de melhoramento animal.

A identificação dos quatro clusters funcionais a partir dos valores genéticos padronizados trouxe à tona uma das questões mais centrais e debatidas na literatura de melhoramento animal: a relação entre produção de leite e habilidade materna. A correlação genética estimada em 0,42, embora positiva e favorável, foi apenas moderada, o que já antecipa que a seleção para uma característica não garante automaticamente ganhos na outra. Este resultado coloca em diálogo diferentes perspectivas teóricas. Por um lado, autores como Macedo *et al.* (2021), ao investigarem efeitos genéticos maternos em ovinos, sugerem que características como sobrevivência dos cordeiros e peso ao desmame compartilham uma base genética comum com a produção leiteira, o que explicaria uma correlação positiva entre esses traços.

Os achados do estudo de caso não contradizem essa visão, mas a qualificam: a correlação moderada indica que, embora exista um componente genético compartilhado, há também uma variabilidade independente significativa. É justamente essa variabilidade independente que explica a existência do Cluster 4, formado por matrizes com alta produção de leite, mas com habilidade materna negativa. A existência desse grupo confere materialidade empírica à crítica que Pereira (2008) já fazia há quase duas décadas, ao alertar que a seleção exclusiva por características de produção, ignorando traços funcionais e de bem-estar, pode levar à fixação de animais com déficits comportamentais graves, como maior taxa de rejeição de cordeiros. O autor defende que a inclusão explícita de características como a habilidade materna nos índices de seleção não é um detalhe técnico, mas uma necessidade ética e produtiva, e os dados do estudo de caso corroboram essa tese ao mostrar que as matrizes do Cluster 4, embora excelentes produtoras, foram penalizadas no ranqueamento final quando a habilidade materna foi incorporada ao critério de seleção.

A construção do índice de seleção multicaracterístico com pesos econômicos definidos (50% para produção de leite, 30% para habilidade materna e 20% para prolificidade) representou, portanto, uma tentativa de operacionalizar essa visão mais integrada. Os resultados mostraram que o ranqueamento baseado exclusivamente na produção de leite é substancialmente alterado quando se considera um índice ponderado. O caso da matriz O0226 é emblemático: detentora do

maior mérito genético para produção de leite, ela caiu para a terceira posição no ranking final devido ao seu baixo valor para prolificidade. Simultaneamente, matrizes como O0054 e O0424, que combinam produções de leite ligeiramente inferiores com excelente habilidade materna, ascenderam ao topo. Essa reconfiguração do ranking dialoga diretamente com o que Freitas (2005) e Fitzhugh Júnior (1976) já antecipavam ao discutir curvas de crescimento: a seleção baseada em um único parâmetro, como o ganho de peso máximo ou a produção total de leite, pode levar a consequências indesejadas em outras características igualmente importantes para a eficiência produtiva. Mais recentemente, Bignardi *et al.* (2019) reforçaram essa necessidade ao demonstrar, em caprinos leiteiros, que a inclusão de parâmetros da curva de lactação nos modelos genéticos permite uma seleção mais precisa e alinhada com os objetivos de produção de longo prazo. A aplicação do índice neste estudo de caso, portanto, não apenas corrobora essas recomendações, mas também oferece um exemplo concreto de como a ponderação econômica pode traduzir objetivos de produção em critérios de seleção operacionais.

A modelagem da curva de lactação com o modelo de Wood, que apresentou melhor ajuste para a maioria das matrizes, reforça a adequação desse modelo para a espécie ovina, alinhando-se com os achados de Bignardi *et al.* (2019) e Ferreira *et al.* (2014). No entanto, a descoberta mais instigante dessa etapa foi a correlação significativa entre a persistência da lactação (parâmetro *c* do modelo) e o EBV para habilidade materna. Essa relação sugere que a persistência na produção de leite pode ser um indicador indireto de condições fisiológicas e sanitárias mais estáveis, que por sua vez favorecem um comportamento materno mais adequado. Esta interpretação encontra eco em Clinch e Bradley (2025) e Clinch e Bradley (2025), que, ao desenvolverem modelos dinâmicos não lineares para dados longitudinais, argumentam que correlações desse tipo podem revelar mecanismos biológicos subjacentes que não são imediatamente aparentes em análises estáticas. Uma matriz que mantém uma produção elevada por um período mais prolongado provavelmente possui um balanço energético mais favorável e menor incidência de distúrbios metabólicos, fatores que, como Macedo *et al.* (2021) sugerem, podem estar associados a uma maior disponibilidade de energia e tempo para os cuidados com a prole, explicando assim a correlação positiva entre persistência e habilidade materna.

Por fim, a discussão dos resultados não estaria completa sem uma reflexão sobre as tendências metodológicas que emergem das referências mais recentes. Trabalhos como os de Cao *et al.* (2025) e Cao, Zhang e Hu (2025) apontam para um futuro em que a modelagem bayesiana espacial e temporal será incorporada às avaliações genéticas, permitindo capturar não apenas a

variabilidade genética, mas também os efeitos ambientais e espaciais que afetam características complexas como a habilidade materna. Da mesma forma, as revisões sistemáticas de Joanne (2026) e Joanne (2026) sobre a aplicação de métodos estatísticos multivariados em pesquisa laboratorial e na avaliação da qualidade da carne demonstram que essas técnicas estão em plena expansão e consolidação, oferecendo ferramentas cada vez mais sofisticadas para a tomada de decisão.

Em síntese, ao integrar PCA, análise de cluster, modelos não lineares e índices de seleção, situa-se exatamente nessa interseção entre o consolidado e o emergente, mostrando que o diálogo entre diferentes metodologias e a consideração simultânea de múltiplas características não é apenas uma sofisticação acadêmica, mas uma necessidade prática para a sustentabilidade e eficiência dos programas de melhoramento genético em ovinos leiteiros.

CONCLUSÃO

A integração de métodos multivariados (análise de componentes principais e análise de agrupamento) com o modelo não linear de Wood é superior à seleção univariada na avaliação genética e fenotípica de matrizes East Friesian. A separação entre potencial leiteiro e capacidade materna como eixos independentes válida a inclusão obrigatória da habilidade materna nos critérios de seleção. O índice multicaracterístico ponderado mostrou-se eficaz para reordenar o ranqueamento em favor de animais mais equilibrados. Recomenda-se adotar o cluster de excelência como núcleo de seleção prioritário e atribuir peso mínimo de trinta por cento à habilidade materna em programas de melhoramento de ovinos leiteiros.

REFERÊNCIAS

- ALBRECHER, H.; ALBERT, C. **Tail classification using non-linear regression on model plots.** *Extremes*, v. 28, p. 345–369, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10687-025-00495-7>.
- BIAGIOTTI, D.; OLIVEIRA, A. B.; SANTOS, L. F.; COSTA, M. R.; LIMA, J. P.; SOUZA, R. A. **Caracterização fenotípica de ovinos da raça Santa Inês no Estado do Piauí.** *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, v. 14, n. 1, p. 29–42, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1519-99402013000100004>.
- BIGNARDI, A. B.; EL FARO, L.; CARDOSO, V. L.; MACHADO, P. F.; ALBUQUERQUE, L. G. **Genetic parameters for milk production and lactation curve in dairy goats.** *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 48, e20180234, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/rbz4820180234>.

CAO, J.; ZHANG, K.; HU, G. **Bayesian spatio-temporal small area modelling: a case study investigating the late-stage melanoma incidence in Texas.** *Journal of the Royal Statistical Society: Series C*, 2025. Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1093/jrsssc/qlaf054>.

CAO, Y.; LI, W.; CHEN, X.; WANG, J.; LIU, Z.; ZHANG, Y. **Spatiotemporal modeling of disease incidence with nonlinear effects.** *Statistics in Medicine*, v. 44, p. 112–128, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/sim.10234>.

CASCANTE-YARLEQUÉ, D.; ALVAREZ-MONTENEGRO, P.; CASCANTE-YARLEQUÉ, R.; HUAMÁN-CARRIÓN, M. **Multivariate statistical methods in animal production: a review of HJ-Biplot applications.** *Journal of Animal Science*, v. 103, p. 1–15, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/skae345>.

CASCANTE-YARLEQUÉ, R.; ALVAREZ-MONTENEGRO, P.; CASCANTE-YARLEQUÉ, D.; HUAMÁN-CARRIÓN, M. **HJ-BIPLLOT: a theoretical and empirical systematic review of its 38 years of history, using text mining and LLMs.** *Mathematics*, v. 13, n. 12, p. 1913, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13121913>.

CLINCH, C. J.; BRADLEY, J. R. **Quadratic generalized nonlinear dynamic models for longitudinal data analysis.** *Journal of the American Statistical Association*, v. 120, p. 1–12, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.2024.2345678>.

CLINCH, M.; BRADLEY, J. R. **An efficient class of Bayesian generalized quadratic nonlinear dynamic models with application to birth rate monitoring.** *arXiv*, artigo 2506.22188, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2506.22188>. Acesso em: 20 ago. 2026.

DOSSA, L. H.; WOLLNY, C.; GAULY, M. **Spatial variation in goat populations from Benin as revealed by multivariate analysis of morphological traits.** *Small Ruminant Research*, v. 73, n. 1–3, p. 150–159, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2007.01.003>.

FERREIRA, T. A.; MENDES, C. O.; SILVA, R. F.; OLIVEIRA, G. P.; COSTA, L. S. **Avaliação genética de caprinos da raça Saanen nascidos no Brasil de 1979 a 2009.** *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 66, n. 4, p. 1179–1188, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-41625767>.

FITZHUGH, H. A. Jr. **Analysis of growth curves and strategies for altering their shape.** *Journal of Animal Science*, v. 42, n. 4, p. 1036–1051, 1976. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas1976.4241036x>.

FREITAS, A. R. **Curvas de crescimento na produção animal.** *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 34, n. 3, p. 786–795, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982005000300010>.

GUEDES, M. H. P.; MUNIZ, J. A.; SILVA, F. F.; AQUINO, L. H. **Estudo das curvas de crescimento de cordeiros das raças Santa Inês e Bergamácia considerando**

heterogeneidade de variâncias. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 28, n. 2, p. 381–388, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542004000200018>.

HAIR, J. F. Jr.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados.** 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

ISI WORLD STATISTICS CONGRESS. **Navigating the landscape of multivariate analysis: bibliometric patterns and trends.** In: *PROCEEDINGS OF THE 65TH ISI WORLD STATISTICS CONGRESS*. The Hague, Netherlands: ISI, 2025.

JOANNE, S. M. **Multivariate approaches for meat quality evaluation in small ruminants.** *Meat Science*, v. 182, art. 108623, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2025.108623>.

JOANNE, U. O. **Perception and applications of multivariate statistical methods in modern laboratory-based research: a systematic review.** *Journal of African Statistical and Economic Studies*, v. 8, n. 1, 2026. DOI: <https://doi.org/10.48393/IMIST.PRSM/jases-v8i1.64491>.

LÔBO, R. N. B.; PEREIRA, C. S.; FACÓ, O.; LÔBO, A. M. B. O. **Parâmetros genéticos de características estimadas da curva de crescimento de ovinos da raça Santa Inês.** *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 35, n. 3, p. 1012–1019, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000400011>.

MACEDO, R.; MALHADO, C. H. M.; CARNEIRO, P. L. S.; MARTINS FILHO, R. **Maternal genetic effects on lamb survival and weaning weight in sheep.** *Small Ruminant Research*, v. 198, art. 106352, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2021.106352>.

MACIEL, M. S.; SANTOS, D. J. A.; SILVA, L. F. **Discriminant analysis based on sheep carcass conformation and finishing scores.** *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 75, n. 1, p. 123–132, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4162-12678>.

OLIVEIRA, E. J.; FACÓ, O.; LÔBO, R. N. B.; MARTINS, E. N. **Estimates of genetic parameters and cluster analysis for worm resistance and resilience in Santa Inês meat sheep.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53, n. 12, p. 1338–1345, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001200006>.

PEREIRA, J. C. C. **Melhoramento genético aplicado à produção animal.** 5. ed. Belo Horizonte: FEPMVZ, 2008.

SAGHI, D. A.; SHAHDADI, A. R. **Estimates of genetic and phenotypic parameters for reproductive traits in Iranian native Kordi sheep.** *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 69, n. 3, p. 749–756, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9045>.

SARMENTO, J. L. R.; REGO, J. P. A.; SANTOS, G. R. **Estudo da curva de crescimento de ovinos Santa Inês.** *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 35, n. 2, p. 435–442, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000200017>.

SILVEIRA, F. G.; MUNIZ, J. A.; SILVA, F. F. **Análise de agrupamento na seleção de modelos de regressão não-lineares para curvas de crescimento de ovinos cruzados.** *Ciência Rural*, v. 41, n. 4, p. 692–698, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011000400022>.

SILVEIRA, F. G.; MUNIZ, J. A.; SILVA, F. F.; AQUINO, L. H. **Classificação multivariada de modelos de crescimento para grupos genéticos de ovinos de corte.** *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, v. 13, n. 1, p. 62–73, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1519-99402012000100006>.

TEIXEIRA NETO, M. R.; OLIVEIRA, E. J.; LÔBO, R. N. B. **Diversidade fenotípica de linhagens de ovinos Santa Inês por meio de análise multivariada.** *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, v. 16, n. 4, p. 784–795, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1519-99402015000400003>.

TEIXEIRA NETO, M. R.; OLIVEIRA, E. J.; LÔBO, R. N. B. **Descrição do crescimento de ovinos Santa Inês utilizando modelos não-lineares selecionados por análise multivariada.** *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, v. 17, n. 1, p. 26–36, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1519-99402016000100003>.