

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**MODELOS DE NORMAS DE REAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO
GENÓTIPO-AMBIENTE EM CARACTERÍSTICAS DE PRODUÇÃO DE LEITE
E IDADE AO PRIMEIRO PARTO DE BOVINOS DA RAÇA GIROLANDO**

Caio de Souza Teixeira

Zootecnista

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**MODELOS DE NORMAS DE REAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO
GENÓTIPO-AMBIENTE EM CARACTERÍSTICAS DE PRODUÇÃO DE LEITE
E IDADE AO PRIMEIRO PARTO DE BOVINOS DA RAÇA GIROLANDO**

Caio de Souza Teixeira

Orientador: **Prof. Dr. Roberto Carvalho**

Coorientador: **Dr. Marcos Vinicius Gualberto
Barbosa da Silva**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,
Câmpus de Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Doutor Genética e Melhoramento Animal

2023

T266m	Teixeira, Caio de Souza Modelos de normas de reação para avaliação da interação genótipo-ambiente em características de produção de leite e idade ao primeiro parto de bovinos da raça Girolando / Caio de Souza Teixeira. -- Jaboticabal, 2023 56 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Roberto Carneiro Coorientador: Marcos Vinicius Gualberto Barbosa da Silva 1. Bovinos leiteiros. 2. Parâmetros genéticos. 3. Seleção. 4. Sensibilidade ambiental. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Registro de Impacto

O presente estudo permitiu a avaliação da interação genótipo-ambiente para as características de produção de leite em até 305 dias e idade ao primeiro parto em bovinos da raça Girolando, ampliando nosso entendimento sobre o comportamento dessas características ao longo de gradientes ambientais gerados pelos modelos de normas de reação. Essa avaliação fornece uma base teórica sólida possibilitando novas pesquisas com o objetivo de, cada vez mais, melhorar a avaliação genética da raça Girolando.

Impact Statement

This study enabled the assessment of genotype-environment interaction for milk production traits up to 305 days and age at first calving in Girolando cattle, expanding our understanding of the behavior of these characteristics across environmental gradients generated by reaction norm models. This evaluation provides a solid theoretical foundation, allowing for further research with the goal of continuously enhancing the genetic evaluation of the Girolando breed.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MODELOS DE NORMAS DE REAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO
GENÓTIPO-AMBIENTE EM CARACTERÍSTICAS DE PRODUÇÃO DE LEITE E IDADE
AO PRIMEIRO PARTO DE BOVINOS DA RAÇA GIROLANDO

AUTOR: CAIO DE SOUZA TEIXEIRA**ORIENTADOR: ROBERTO CARVALHEIRO****COORDENADOR: MARCOS VINÍCIUS GUALBERTO BARBOSA DA SILVA**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Genética e Melhoramento
Animal, pela Comissão Examinadora:


Pesquisador Dr. ROBERTO CARVALHEIRO (Participação Virtual)
Departamento de Zootecnia / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
DANISIO PRADO MUNARI
Data: 30/08/2023 17:10:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. DANISIO PRADO MUNARI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas DECEX / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. CLÁUDIO VIEIRA DE ARAÚJO (Participação Virtual)
Departamento de Zootecnia / Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) - Sinope/MT



Documento assinado digitalmente
DELVAN ALVES DA SILVA
Data: 31/08/2023 09:02:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. DELVAN ALVES DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Zootecnia / Universidade Federal de Viçosa (UFV) - Viçosa/MG

Dr. GABRIEL SOARES CAMPOS (Participação Virtual)
Departamento de Ciência Animal / Purdue University - West Lafayette/EUA

Jaboticabal, 22 de agosto de 2023



Documento assinado digitalmente
CLAUDIO VIEIRA DE ARAUJO
Data: 01/09/2023 15:03:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Documento assinado digitalmente
GABRIEL SOARES CAMPOS
Data: 06/09/2023 15:07:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DADOS CURRICULARES

Caio de Souza Teixeira nascido no dia 24 de julho de 1993, na cidade de Barreirinha, Amazonas, filho de José Roberto da Silva Teixeira e Ana Alcinei Pinto de Souza. Iniciou o curso de Zootecnia em setembro de 2009 no Instituto de Ciências Sociais, Educação e Zootecnia (ICSEZ) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), campus de Parintins. Foi bolsista de iniciação científica (Pibic – CNPq) no período de 2012 a 2013 sob orientação do Professor Dr. Daniel Marino Guedes de Carvalho e (Pibic – FAPEAM) no período de 2013 a 2014 sob orientação da Professora Dra. Soraya Farias de Andrade Freitas. Obteve o título de Bacharel em Zootecnia em março de 2015. Exerceu a função de Professor Auxiliar - Nível 1 do curso de Zootecnia da Universidade Federal do Amazonas no período de 2015 a 2017. Em março de 2017, ingressou no curso de mestrado do programa de Pós-graduação em Zootecnia da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), campus de Sinop, sob orientação do Professor Dr. Cláudio Vieira de Araújo e coorientador Dr. Raysildo Barbosa Lôbo. Foi bolsista CAPES pelo período de março de 2017 a março de 2019. Em março de 2019 ingressou no curso de doutorado pelo programa Pós-graduação em Genética e Melhoramento Animal na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, campus de Jaboticabal, sob orientação da Professor Dr. Roberto Carvalheiro e coorientação da Dr. Marcos Vinicius Gualberto Barbosa da Silva, sendo bolsista da mesma instituição de fomento.

“Somos assim: sonhamos o voo, mas tememos a altura.
Para voar é preciso ter coragem para enfrentar o terror do vazio.
Porque é só no vazio que o voo acontece.
O vazio é o espaço da liberdade, a ausência de certezas.
Mas isso é o que tememos: o não ter certezas.
Por isso, trocamos o voo por gaiolas.
As gaiolas são o lugar onde as certezas *moram*. ”
Rubem Alves

DEDICO

A meus pais, irmãos e meu filho Enrico.
Obrigado pelo amor e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela dádiva da vida e por ter iluminado meu caminho, concedendo-me saúde, resiliência e sabedoria.

A meus pais, Ana Alcinei e José Roberto, por todo amor, carinho, educação e exemplo de luta nas adversidades.

Ao meu filho, Enrico Teixeira, por ser luz, força, motivo e amor.

A Bruna Maria Salatta, por todo amor, anos de companheirismo e fardos divididos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Roberto Carvalheiro, pelos ensinamentos e oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

À Universidade Estadual Paulista (Unesp), ao Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento Animal, seus professores e funcionários, por todo conhecimento compartilhado e serviços prestados.

À EMBRAPA Gado de Leite e a Associação Brasileira dos Criadores de Girolando, por todo suporte e acesso ao banco de dados utilizados nesse estudo.

A meu coorientador Dr. Marcos Vinícius Gualberto Barbosa da Silva, pela contribuição e ensinamentos passados.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa (Código de Financiamento 001).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos membros da banca de defesa da tese, pelas importantes sugestões e considerações que acrescentaram a este trabalho.

Ao Professor Dr. Danísio Prado Munari, pelas orientações dentro e fora da sala de aula e os pães de queijo com café na cantina.

À Professora Dra. Renata Negri pelas conversas de apoio, amizade e por compartilhar seus conhecimentos sobre melhoramento genético da raça Girolando.

Aos amigos de pós-graduação, pelos conhecimentos, risadas e momentos compartilhados.

A meu amigo Dr. Ivan Carvalho, pelas conversas aleatórias e por todo ensinamento e conhecimentos compartilhados.

A todos que de alguma forma contribuíram não apenas para a execução desse trabalho, mas que se fizeram presentes nessa jornada e contribuíram para meu crescimento.

MUITO OBRIGADO!

SUMÁRIO

RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. GERAIS.....	16
2.2. ESPECÍFICOS.....	16
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1. BOVINOCULTURA LEITEIRA.....	16
3.1.1. PRODUÇÃO NACIONAL.....	16
3.1.2. A RAÇA GIROLANDO.....	17
3.2. AMBIENTES DE MANEJO E FORMAÇÃO DOS GRUPOS DE CONTEMPORÂNEOS.....	18
3.3. INTERAÇÃO GENÓTIPO-AMBIENTE	21
3.4. MODELANDO A INTERAÇÃO GENÓTIPO-AMBIENTE	22
3.4.1. MODELO MULTICARACTERÍSTICO PARA GxE	22
3.4.2. MODELOS DE REGRESSÃO ALEATÓRIA E NORMAS DE REAÇÃO.....	23
3.5. SENSIBILIDADE AMBIENTAL	25
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1. DADOS	26
4.2. GRADIENTES AMBIENTAIS	27
4.3. MODELOS DE NORMA DE REAÇÃO	28
5. RESULTADOS	31
5.1. CRITÉRIOS PARA O AJUSTE DOS MODELOS	31
5.2. COMPONENTES DE VARIÂNCIA E PARÂMETROS GENÉTICOS	32
5.3. SENSIBILIDADE AMBIENTAL PARA OS VALORES GENÉTICOS DOS TOUROS.....	38
6. DISCUSSÃO	44
6.1. MODELOS DE NORMA DE REAÇÃO	44
6.2. HERDABILIDADE.....	45
6.3. SENSIBILIDADE AMBIENTAL	47
7. CONCLUSÃO.....	49
8. REFERÊNCIAS	50
9. MATERIAL SUPLEMENTAR	55

MODELOS DE NORMAS DE REAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO GENÓTIPO-AMBIENTE EM CARACTERÍSTICAS DE PRODUÇÃO DE LEITE E IDADE AO PRIMEIRO PARTO DE BOVINOS DA RAÇA GIROLANDO

RESUMO - Objetivou-se avaliar a presença da interação genótipo-ambiente (GxE) para as características de produção de leite (PL305) e idade ao primeiro parto (IPP) de bovinos da raça Girolando via modelos de normas de reação. Utilizaram-se registros relativos à produção de leite em até 305 dias na primeira lactação (PL305), idade ao primeiro parto (IPP) e empregou-se cinco modelos de normas de reação (MNR) com base na pressuposição dos resíduos, ajustando-se um modelo linear considerando a variância residual homocedástica (MNR_hom), e quatro modelos considerando heterocedasticidade, sendo linear (MNR_het), quadrático (MNR_q), linear-linear (MNR_l-l) e quadrático-quadrático (MNR_q-q). Os gradientes ambientais (GA) foram definidos com base nas soluções padronizadas dos grupos de contemporâneos (GC) ($\mu=0$; $\sigma^2=1$) obtidas por meio de análise prévia utilizando o modelo animal, sem considerar a GxE. As estimativas de herdabilidade pelo MNR_hom para PL305 indicaram que ao assumir homocedasticidade, parte da variância residual foi estimada como variância genética aditiva, ocasionando sub e superestimação da herdabilidade nos ambientes desfavorável e favorável, respectivamente. Para os modelos MNR_het e MNR_l-l, foram observadas estimativas médias de herdabilidade de 0,14 para PL305 e 0,10 para IPP. As estimativas de correlação genética dos animais entre os ambientes desfavorável e favorável ao longo do gradiente ambiental apresentaram declínio, sendo mais acentuadas entre o ambiente *desfavorável e favorável no* $GA \leq -1$ e $GA \geq -1$ para PL305 e IPP, o que caracteriza a presença da GxE para essas características ao longo do GA. Para MNR_l-l o percentual de animais robustos, plásticos e extremamente plásticos para PL305 foram de 66,7%, 29,6% e 3,7%. Já IPP apresentou de 68% e 32% de classificação para animais robustos e plásticos respectivamente. Existe interação genótipo para produção de leite em até 305 dias e idade ao primeiro parto em bovinos da raça Girolando no Brasil. A sensibilidade à variação ambiental contempla uma não linearidade, de modo que animais mais sensíveis a mudanças ambientais favoráveis podem não responder da mesma maneira em ambientes desfavoráveis e vice-versa. A heterogeneidade da variância residual deve ser considerada dentro dos estudos de GxE com os dados utilizados nesse estudo, uma vez que melhora sua avaliação. O modelo heterocedásticos spline linear-linear é recomendado para avaliação genética da produção de leite em até 305 dias e Idade ao primeiro parto em bovinos da raça Girolando.

Palavras-chave: bovinos leiteiros, parâmetros genéticos, seleção, sensibilidade ambiental

REACTION NORM MODELS FOR EVALUATING GENOTYPE-ENVIRONMENT INTERACTION IN MILK PRODUCTION TRAITS AND AGE AT FIRST CALVING OF GIROLANDO CATTLE

ABSTRACT - The aim was to assess the presence of genotype-environment interaction (GxE) for milk production traits (PL305) and age at first calving (IPP) in Girolando cattle using reaction norm models. Records related to milk production within the first 305 days of lactation (PL305) and age at first calving (IPP) were used. Five reaction norm models (RNM) were employed based on the assumption of residuals, fitting a linear model considering homoscedastic residual variance (RNM_hom), and four models considering heteroscedasticity: linear (RNM_het), quadratic (RNM_q), linear-linear (RNM_l-l), and quadratic-quadratic (RNM_q-q). The environmental gradients (GA) were defined based on *the standardized solutions of contemporary groups (GC)* ($\mu=0$; $\sigma^2=1$) obtained through a previous analysis using the animal model, without considering GxE. Heritability estimates using RNM_hom for PL305 indicated that by assuming homoscedasticity, a portion of the residual variance was estimated as additive genetic variance, resulting in underestimation and overestimation of heritability in unfavorable and favorable environments, respectively. For the RNM_het and RNM_l-l models, mean heritability estimates of 0.14 for PL305 and 0.10 for IPP were observed. Genetic correlation estimates of animals between unfavorable and favorable environments along the environmental gradient showed a decline, with more pronounced differences between the unfavorable and favorable environments at $GA \leq -1$ and $GA \geq 1$ for PL305 and IPP. This characterizes the presence of GxE for these traits along the environmental gradient. For RNM_l-l, the percentages of robust, plastic, and extremely plastic animals for PL305 were 66.7%, 29.6%, and 3.7%, respectively. For IPP, there were 68% and 32% of animals classified as robust and plastic, respectively. There is genotype interaction for milk production within the first 305 days and age at first calving in Girolando cattle in Brazil. The sensitivity to environmental variation encompasses non-linearity, such that animals more responsive to favorable environmental changes may not respond in the same way in unfavorable environments, and vice versa. The heterogeneity of residual variance should be considered in GxE studies with the data used in this study, as it enhances its evaluation. The linear-linear spline heteroscedastic model is recommended for the genetic assessment of milk production within the first 305 days and age at first calving in Girolando cattle.

Keywords: dairy cattle, environmental sensitivity, genetic parameters, selection

1. INTRODUÇÃO

A produção leiteira na bovinocultura tem apresentado crescimento constante no cenário global, impulsionada pelo aumento da demanda por produtos lácteos. Dados da FAO (2022) demonstraram crescimento relevante de 21% entre os períodos de 2011 a 2021. Esse crescimento está diretamente relacionado ao aumento da população global, à urbanização e ao aumento da renda familiar. No Brasil, a bovinocultura de leite desempenha um papel socioeconômico de grande importância, estando essa atividade diretamente ligada às cooperativas e à produção familiar, em sua maioria.

Entre os anos de 2019 e 2021 a produção anual média do país foi de 25,2 bilhões de litros de leite fechando o ano de 2022 com 22,98 bilhões de litros (IBGE, 2022). Esse cenário de baixa na produção, pode ser explicado pelo maior custo de produção de leite no país, fazendo com que as margens financeiras fossem apertadas, com transferência de renda à indústria, supermercados e varejo em geral. O ano de 2021 foi marcado por oscilações de preços, tanto nos valores recebidos pelo produtor de leite como na compra de insumos, tendo impacto direto na relação de troca entre esses produtos.

Por outro lado, em 2022 observou-se a acomodação dessa relação, retornando a patamares pré-pandêmicos, com a diminuição dos custos de produção e estabilização do preço pago ao produtor. De acordo com a Embrapa, (2023), a produção de leite deverá crescer 3,6% em 2023, atingindo 24,5 milhões de toneladas. O consumo de leite fluido acompanhará a mesma tendência com um acréscimo de 3%. No entanto, o volume exportado deve ser semelhante ao exportado em 2022.

Os desafios da cadeia produtiva de leite abrangem a busca por maior eficiência produtiva, redução dos custos de produção e melhorias da qualidade do leite, o que faz com que os produtores invistam cada vez mais em tecnologia e inovação. Nesse sentido, a seleção do material genético que responda a esses investimentos tem sido o foco em estudos há vários anos. Alcançar as metas de produção com o material genético apropriado a determinado sistema produtivo elimina uma das várias barreiras diante de um mercado cada vez mais competitivo.

Grande parte do leite produzido no país provém de animais com a composição genética Holandesa e Gir, como Girolando, que nos últimos 20 anos apresentou acréscimo de 60% na média de produção de leite em até 305 dias, fruto dos programas de melhoramento genético da raça (SILVA et al., 2022). O Girolando é uma raça bovina oriunda do cruzamento das raças Holandesa (HOL) e Gir (GIR), extremamente adaptado às condições tropicais brasileiras, estando distribuído nas diversas regiões do país. No entanto, as diferenças nas condições dos ambientes de produção têm sido apontadas como importante fator para variações fenotípicas. Assim, de um modo geral, genótipos podem apresentar diferentes respostas a ambientes mais ou menos favoráveis, o que caracteriza a interação genótipo-ambiente (GxE) (FALCONER; MACKAY, 1996).

Na prática, a importância da GxE é maior quando se avalia a magnitude de sua influência sobre características econômicas. No Brasil, a avaliação genética de bovinos de leite abrange rebanhos que são criados em ambientes com grandes variações. Para Lopes et al., (2008) as médias de produção e as variâncias genéticas e fenotípicas das principais características de interesse econômico diferem de acordo com o ambiente. Segundo Ribeiro et al., (2009), os principais programas de melhoramento genético no Brasil, assumem a pressuposição da ausência da GxE, ou seja, consideram constantes as variâncias residuais e genéticas. Uma vez que a classificação dos animais pode diferir entre ambientes, argumenta-se então que a escolha do material genético para a próxima geração em uma fazenda específica deve ser baseada em avaliações em um ambiente similar ao qual a prole será submetida (BIGNARDI et al., 2015).

Diferentes abordagens têm sido utilizadas para a definição de métodos estatísticos que ajudem na identificação da GxE e auxiliem os programas de melhoramento genético animal a aumentarem a eficiência de seleção. Dentre eles, os modelos de norma de reação (MNR) tem sido uma das metodologias mais utilizadas para a avaliação da presença da GxE (SANTANA et al., 2013).

A maioria dos estudos realizados utilizando os MNR com rebanhos bovinos leiteiros, indicaram a presença de GxE, apresentando importantes impactos sobre parâmetros e correlações genéticas (CALUS; VEERKAMP, 2003; BIGNARDI et al., 2015). No entanto, há a necessidade de se ajustar o melhor MNR de acordo com a expressão fenotípica, uma vez que essa pode não

obedecer a uma mudança constante com as variações do gradiente ambiental. A escolha do MNR é de fundamental importância para avaliar adequadamente a sensibilidade de cada animal à variação ambiental. Dessa forma, torna-se necessário o estudo sobre os MNR que melhor representam a realidade dos sistemas produtivos, aumentando a acurácia das predições dos valores genéticos, de forma a promover a seleção de animais mais robustos a cada sistema de manejo.

Portanto, o estudo da GxE por meio dos MNR torna-se importante, tendo em vista a possibilidade de aumento da acurácia de predição dos valores genéticos e a identificação de animais com menor sensibilidade à variação ambiental.

2. OBJETIVOS

2.1. Gerais

Avaliar a presença da interação genótipo ambiente para as características de produção de leite e idade ao primeiro parto de bovinos da raça Girolando com a utilização de modelos de normas de reação.

2.2. Específicos

- Estimar os componentes de variância e avaliar a ocorrência de interação genótipo-ambiente para as características estudadas.
- Avaliar os modelos de normas de reação com melhor ajuste aos dados, quanto à pressuposição de resíduos.
- Testar se a sensibilidade à variação ambiental é constante ou não linear ao longo do gradiente ambiental, com a aplicação de modelos de normas de reação utilizando diferentes polinômios.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Bovinocultura leiteira

3.1.1. Produção nacional

A bovinocultura de leite mundial foi responsável pela produção de 781 milhões de toneladas de leite em 2021 (FAOSTAT, 2022). No Brasil, a

bovinocultura de leite é reconhecida como uma das cadeias agroindustriais mais importantes do agronegócio sob a ótica social e econômica, estando presente em todo o território nacional, com papel relevante no suprimento de alimentos, geração de empregos e de renda para a população (NETO et al., 2013). O Brasil é o quinto maior produtor de bovinos leiteiros do mundo, superado apenas pela Índia, Estados Unidos, Paquistão e China (FAOSTAT, 2022). Em 2022 o total de leite produzido em todo país foi de 23,7 milhões de toneladas, proveniente de um rebanho de 16,8 milhões de vacas em lactação (USDA, 2022).

Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Goiás são os estados com maior produção de leite do país, com uma produção de 9.611.714, 4.415.636, 4.385.191, 3.161.997 e 3.121.396 mil litros de leite no ano de 2021, respectivamente, sendo responsáveis por 70% da produção nacional (IBGE, 2022). Esse cenário confirma as regiões Sudestes, Centro-Oeste e Sul com maior destaque na produção de leite no país, contudo, também denota oportunidades de crescimento em regiões e estados.

A produção de leite inspecionado no Brasil deve crescer cerca de 3,6% em 2023, atingindo 24,5 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2023). Isso se deve em grande parte a recuperação da economia, diminuição no preço dos insumos utilizados para produção, menor custo do produto na prateleira e maior demanda pelos consumidores, que veem seu poder aquisitivo crescer no primeiro semestre de 2023. Por outro lado, a produção sazonal tem sofrido quedas pontuais no meio do ano em razão dos sistemas de exploração, que tem como base o pastejo, ser prejudicado pelo período de seca, afetando a oferta e a qualidade das forragens oferecidas ao rebanho (EMBRAPA, 2023).

3.1.2. A Raça Girolando

Do total de leite produzido no Brasil, estima-se que 80% são provenientes de animais cruzados (HOL:GIR) e da raça Girolando (SILVA, et al., 2022). A formação da raça Girolando iniciou-se na década de 1940, por meio do cruzamento entre animais da raça Holandês (*Bos taurus taurus*) e Gir (*Bos taurus indicus*), o objetivo era criar uma raça capaz de produzir leite de modo sustentável em ambientes com condições de manejo diferente, aliando a alta capacidade de produção de leite do gado Holandês à rusticidade da raça Gir

(CANAZA-CAYO et al., 2014). Em 1989, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), juntamente com as associações de produtores, formalizou as normas para formação da raça Girolando – Gado Leiteiro Tropical, transformando-o em prioridade nos programas de melhoramento genético de gado leiteiro no Brasil (CANAZA-CAYO et al., 2014). Em 1996 a raça Girolando foi oficializada pelo MAPA e desde então a Associação Brasileira dos Criadores de Girolando é responsável por desenvolver e acompanhar o Registro Genealógico e as Provas Zootécnicas da raça coletando e avaliando dados de características de produção, reprodução, conformação e manejo (SILVA et al., 2010).

Segundo o MAPA, são considerados puros sintéticos da raça Girolando, os animais que apresentam proporção genética 5/8 Holandês e 3/8 Gir. Apesar disso, muitos rebanhos no Brasil são compostos principalmente por animais de outros grupos genéticos, como 1/2 Holandês + 1/2 Gir e 1/4 Holandês + 3/4 Gir. Existem diversas estratégias de acasalamentos alternados entre as raças Holandês e Gir para chegar à formação do puro sintético, que são direcionadas de acordo com os objetivos de seleção do produtor. A produtividade dos animais da raça Girolando depende do processo de seleção durante a formação da raça, sendo fundamental a escolha adequada dos animais de raças puras (FACÓ et al., 2005; 2008).

O Girolando vem ganhando cada vez mais reconhecimento a nível nacional e internacional, sendo a raça preferida para produção de leite em regiões tropicais devido à sua capacidade de manter bom nível de produção em diferentes sistemas de manejo e condições climáticas (SILVA et al., 2022). Animais da raça Girolando são bem adaptados aos sistemas de produção do Brasil e apresentam bom desempenho produtivo, principalmente em boas condições de manejo nutricional (SILVA & VELOSO, 2011).

3.2. Ambientes de manejo e formação dos grupos de contemporâneos.

As características climáticas no Brasil são extremamente diversificadas devido às suas dimensões continentais. O país é conhecido por ter uma grande variedade de ecossistemas, desde a Floresta Amazônica até a Caatinga no Nordeste do país. Além disso, o clima varia de região para região, com áreas de

clima tropical úmido, semiárido, subtropical e equatorial (LIMA et al., 2019). A maior parte do território brasileiro está localizada na zona tropical, o que resulta em temperaturas elevadas devido à intensa radiação solar. Em média, a temperatura do ar é superior a 20°C, sendo que, em muitas regiões, a temperatura máxima pode chegar a valores entre 35°C e 38°C durante grande parte do ano (TITTO, 1998).

Essas características resultam em diferentes ambientes de manejo para a produção de leite em todo país, que além do fator climático, sofrem influência da disponibilidade de recurso naturais, práticas agrícolas e tradições locais. Regiões próximas a polos produtores de grãos e interligadas pela malha rodoviária tendem a ter sistemas de produção mais tecnificados, com maior controle sobre sanidade, reprodução e nutrição dos animais. Por outro lado, regiões afastadas desses polos e com escassez de recursos naturais, tendem a apresentar menor controle de sua atividade.

De acordo com Assis et al., (2005) os sistemas de produção de leite no país podem ser definidos de acordo com o grau de intensificação e o nível de produtividade. Os autores definiram quatro tipos de sistemas, sendo eles:

- Sistema extensivo – animais de produção de até 1.200 litros de leite vaca ordenhada/ano, criados exclusivamente a pasto;
- Sistema semi-extensivo – animais com produção entre 1.200 a 2.000 litros de leite por vaca ordenhada/ano, criados a pasto, com suplementação volumosa na época de menor crescimento de pasto;
- Sistema intensivo a pasto – animais com produção de 2.000 a 4.500 litros de leite vaca ordenhada/ano, criados a pasto com forrageiras de alta capacidade de suporte, com suplementação volumosa na época de menor crescimento de pasto e, em alguns casos, durante o ano todo; e
- Sistema intensivo em confinamento – animais com produção acima de 4.500 litros de leite por vaca ordenhada/ano, mantidos confinados e alimentados no cocho com forragens conservadas, com silagens e fenos.

Quando a estratégia de produção passa pela seleção de uma genética adequada a cada sistema produtivo, vários são os fatores que minimizam a assertividade na escolha desses animais. Uma das principais dificuldades é associar genótipos altamente produtivos a ambientes menos favoráveis, pois os animais mais adaptados tendem a ter menor ingestão alimentar e produção de

leite, conforme observado por Façanha et al. (2013). No entanto o aumento da produção de leite pode incluir o uso de genótipos mais produtivos, proporcionando ambiente compatível com as exigências dos animais assim como, estratégias que mitiguem a sazonalidade da oferta de alimentos em volume e qualidade adequada.

Com a evolução das biotecnologias reprodutivas na bovinocultura leiteira, a disseminação do material genético tem proporcionado a avaliação de touros com progênies em diferentes sistemas de produção distribuídos pelo território nacional. No entanto, para que a avaliação genética tenha a acurácia desejada, é de fundamental importância a identificação e separação dos fatores genéticos e ambientais, uma vez que o meio ambiente é responsável por grande parte da variação fenotípica de um animal. Faz-se necessário então o agrupamento dos animais quanto a chance dada para expressar seu fenótipo, chance essa que envolve nutrição, aspectos sanitários, variáveis climáticas, topográficas e manejo. Este tipo de agrupamento denominado grupo de manejo serve para que os programas de avaliação genética determinem os Grupos de contemporâneos (GC) (SHIMBO et al., 2000).

Para as avaliações genéticas, o critério de agrupamento mais utilizado é a formação de GC com base em fatores como rebanho, ano, estação de parto, estação de nascimento, e são usualmente considerados como efeito fixo, nos modelos de avaliação genética. Ao considerar um GC como fixo, as avaliações genéticas tornam-se invariantes para os efeitos de GC. Espera-se com esta propriedade, remover o viés das comparações genéticas devido a associação entre GC e touros (VAN VLECK, 1987).

Um dos grandes dilemas na formação de GC é a definição do tamanho ideal de modo que possam conter o maior número de indivíduos e abranger condições de ambiente menos heterogêneas. Quanto maior o número de indivíduos por GC, maior será a acurácia das estimativas dos valores genéticos. Isso se deve a um conceito estatístico simples: quanto maior for uma amostra tomada ao acaso em uma população, maior a chance de a média desta amostra estar próxima a média real da população (OLIVEIRA,1995).

Outra característica importante na estrutura de dados é a conexidade genética que ocorre pelas ligações genéticas entre as populações de diferentes rebanhos ou regiões, e pode ser desenvolvida pelo parentesco entre os animais

explorados em diferentes ambientes. Assim, as observações de um mesmo GC estão conectadas por compartilharem o mesmo ambiente (COBUCI; ABREU; TORRES, 2006). De acordo com Oliveira (1995), a conexidade entre os GC é necessária na medida em que sua perda determina uma redução na acurácia das avaliações genéticas. Dois GC são considerados conectados se: 1 - um animal tem dados de produção nos dois grupos; 2 – um animal tenha progênie com dados nos dois grupos; 3 – um animal tenha dados de produção em um grupo e progênie com dados em outro.

3.3. Interação genótipo-ambiente

A interação genótipo-ambiente (GxE) pode ser descrita como uma alteração no desempenho relativo de um genótipo em diferentes ambientes (Bowman, 1972). A GxE pode resultar em diferentes efeitos na expressão das características, levando a respostas distintas entre diferentes genótipos quando sujeitos a condições adversas. Quando os genótipos exibem diferenças nas estimativas do valor genético (EBV) em ambientes diferentes, mas sem alterações na ordenação, ocorre um efeito de escala do EBV devido à influência ambiental. Por outro lado, quando os genótipos exibem diferentes níveis de respostas de acordo com as condições ambientais, pode ocorrer uma reorganização na classificação dos genótipos (MOTA, 2019). O efeito de escala, resultante da GxE nos valores do EBV, é de menor relevância, uma vez que o melhor genótipo em um ambiente específico continuaria sendo o melhor em outros ambientes.

Embora seja de grande importância na produção animal, a GxE é muitas vezes negligenciada nas avaliações genéticas atuais, que assumem a homogeneidade das variâncias entre os níveis dos efeitos fixos do modelo estatístico proposto (Reverter et al., 1997). A importância desse componente de variação foi inicialmente destacada por Lush (1945), o qual afirmava que os animais deveriam ser mantidos e avaliados nos locais no qual suas progênies seriam criadas. Posteriormente, Haldane (1946) chamou atenção para que a GxE pode apresentar diversas formas e que deveria corresponder a um componente de variância e que a ordenação dos genótipos em cada ambiente poderia ser utilizada para indicar a presença dessa interação.

A GxE que leva a uma reordenação dos valores genéticos de animais para características avaliadas em diferentes condições ambientais, pode ser considerada como característica distinta (Kolmodin et al., 2002), e a magnitude do efeito da interação GxE pode ser avaliada pela correlação genética da característica em diferentes condições ambientais (FALCONER & MACKAY, 1996; KOLMODIN et al., 2002).

Robertson (1959), sugeriu o uso da correlação genética para relacionar o desempenho em dois ambientes diferentes, abordando não como a mesma característica, mas como características diferentes. Quando a correlação for maior que 0,80 não há interação significativa, ou seja, os genes expressos nos dois ambientes influenciam determinada característica de maneira similar. Quando a correlação for menor que 0,80 a interação passa a assumir importante papel e as características devem ser consideradas distintas.

3.4. Modelando a interação genótipo-ambiente

3.4.1. Modelo multicaracterístico para GxE

O modelo multicaracterístico pode ser empregado quando as condições ambientais são descritas por poucas categorias, por exemplo, quando se avaliam sistemas de produção (pastagem x confinamento), nível de nutrição (alto x baixo), sistemas de produção ou teste de desempenho em diferentes países. Nos modelos multicaracterísticos para interação GxE, assume-se que as mesmas informações fenotípicas, medidas em diferentes condições ambientais, são consideradas como características diferentes. Assim, os componentes de (co)variâncias podem ser estimados para uma característica em cada condição ambiental, e a reordenação dos animais entre diferentes condições ambientais é quantificada pela correlação genética (Robertson, 1959).

A abordagem para a utilização do modelo multicaracterístico pode ser descrita como:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & 0 & 0 \\ 0 & X_2 & 0 \\ 0 & 0 & X_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{12} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}$$

em que **y1**, **y2** e **y3** representam a mesma característica avaliada em diferentes ambientes, **X** é uma matriz de incidência de níveis dos efeitos fixos; **β** é um vetor

de efeitos fixos referentes às classes de grupo de contemporâneos e efeito linear e quadrático da idade da vaca ao parto, como covariável; Z é uma matriz de incidência dos valores genéticos aditivo direto; $\mathbf{a}$ é um vetor de valores genéticos aditivo direto dos animais; e $\mathbf{e}$ é um vetor de resíduos da mesma dimensão de $\mathbf{y}$.

As pressuposições acerca da distribuição dos vetores $\mathbf{y}$, $\mathbf{a}$, e $\mathbf{e}$, são descritas como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{a} \\ \mathbf{e} \end{bmatrix} \sim \left\{ \begin{bmatrix} X\beta \\ \phi \\ \phi \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} ZGZ' + R & ZG & R \\ & G & \phi \\ & R & \phi \end{bmatrix} \right\}$$

Em que $G=A \otimes G_0$; e $R=I \otimes R_0$, sendo A a matriz de parentesco entre os indivíduos, de ordem igual ao número de indivíduos; G_0 , e R_0 são matrizes de (co)variâncias genéticas aditivas diretas e de ambiente temporário, respectivamente.

Os modelos multicaracterísticos permitem estimar a correlação genética entre as mesmas características sob diferentes condições ambientais. Assim, a correlação genética de uma característica entre ambientes é definida como $r_{aE1,aE2} = \sigma_{aE1,aE2} / \sqrt{\sigma_{aE1}^2 * \sigma_{aE2}^2}$ e é estimada por meio de parâmetros genéticos. Quando a correlação é menor que 0,80 a interação passa a assumir importante papel e as características devem ser consideradas distintas.

3.4.2. Modelos de regressão aleatória e Normas de reação

Os modelos de regressão aleatória (MRA) são muito utilizados para modelar características que possuem medidas repetidas, denominadas de características repetidas ou dados longitudinais (SCHAEFFER & DEKKERS, 1994). De acordo com Henderson, (1984), existem diferentes coeficientes de regressão associados as características de dimensão infinita (longitudinais), de formar que, se os indivíduos são tratados como efeitos aleatórios, os coeficientes de regressão associados a estes também devem ser tratados como aleatórios, caracterizando assim os MRA

Com a utilização dos MRA, é possível estimar os valores genéticos do indivíduo para qualquer ponto de uma curva na escala de tempo ou espaço de uma determinada característica. De acordo com El Faro & Albuquerque (2003), os MRA permitem ajustar curvas de lactação aleatórias para cada indivíduo,

como desvios de uma curva média da população, utilizando-se polinômios ordinários ou outras funções lineares. Além disso, possibilitam a obtenção de estruturas de (co)variâncias entre os diferentes controles através de funções de covariância para os efeitos aleatórios de interesse.

Um conceito abordado quando se trabalha com os MRA diz respeito às funções de covariância (FC). As FC foram propostas por Kirkpatrick et al. (1990) para a análise de dados longitudinais, por exemplo, medidas de crescimento ou de lactação e, segundo estes autores, são equivalentes às matrizes de covariância dos modelos multivariados de dimensão finita. As FC podem ser obtidas a partir das matrizes de variância e covariância dos modelos de dimensão finita, ou por meio das matrizes de (co)variância entre os coeficientes de regressão, estimadas pelos MRA (Meyer, 1998).

Considerando as FC é possível a modelagem dos efeitos aleatórios, utilizando funções polinomiais lineares e, além disso, permitem considerar heterogeneidade de variâncias residuais em cada controle El Faro & Albuquerque (2003). A modelagem considerando as variâncias residuais heterogêneas para cada classe pode melhorar a partição da variação total, mas proporciona um aumento no número de parâmetros a serem estimados no processo de maximização da função de verossimilhança. Por meio de modelos de regressão aleatória, é possível obter FC que permitem determinar a Norma de Reação (NR) dos animais em relação às variações graduais no ambiente de produção. Com isso, torna-se possível identificar os genótipos com melhor desempenho em cada faixa do gradiente ambiental (CARDOSO et al., 2005).

De acordo com Woltereck (1909) e Lynch e Walsh (1998), a NR é uma função contínua do ambiente que descreve o fenótipo de um animal. O fenótipo é expresso como uma função polinomial do valor ambiental, onde os coeficientes polinomiais são assumidos para estar sob influência genética (JONG, 1995). Os valores genéticos dos animais para os coeficientes que descrevem a NR são estimados por meio da análise de regressão aleatória, juntamente com as covariâncias desses coeficientes (KOMOLDIN, 2003). Esses coeficientes podem então ser utilizados para calcular os valores genéticos dos animais em relação ao desempenho em um gradiente ambiental.

Os gradientes ambientais podem variar, incluindo fatores como temperatura, latitude e regime alimentar, ou podem ser medidas mais

complexas, como o desempenho médio de todos os genótipos em cada ambiente (KOMOLDIN, 2003). No entanto, o desempenho genotípico médio em bovinos é frequentemente desconhecido, o que leva a uma estimativa aproximada desse valor, considerando o desempenho fenotípico médio em cada ambiente. Essas estimativas são tratadas como covariáveis conhecidas no modelo, conforme relatado por Ravagnolo & Misztal (2000) e Kingsolver et al. (2004). O valor ambiental ou gradiente ambiental pode ser estimado por meio de um modelo animal padrão a partir dos desvios de grupo de contemporâneos, conforme atribuído por Komoldin et al (2002), Calus & Veerkamp (2003) e Cardoso et al. (2005).

Dentre as diferentes maneiras de se abordar a interação genótipo ambiente (GxE) ao executar avaliações genéticas, a utilização do MNR para modelar a resposta à variação ambiental tem sido uma das principais alternativas (STREIT et al., 2012). Estudos como os de Carvalheiro et al. (2019) e Carvalho Filho et al. (2022), evidenciam o comportamento das predições dos valores genéticos regredidos nos gradientes ambientais. Para Santana et al., (2013) a norma de reação é uma das mais utilizadas entre as várias abordagens possíveis para o estudo e detecção da GxE.

Tal metodologia permite a visualização do desempenho animal com a variação do gradiente ambiental, sendo capaz de indicar onde há GxE de acordo com a magnitude desse gradiente. Cardoso & Tempelman, (2012), afirmaram que os MNR podem auxiliar na detecção da interação entre o genótipo e descritores contínuos do gradiente ambiental. No entanto, ainda são necessários estudos sobre os MNR que melhor se ajuste ao conjunto de informações disponíveis dos sistemas de produção de bovinos leiteiros em condições tropicais.

3.5. Sensibilidade Ambiental

A metodologia que emprega a norma de reação para o estudo da GxE pressupõe que o ambiente seja classificado em qualquer escala e que as características possuam continuidade fisiológica em diferentes ambientes, o que permite distinguir a capacidade dos genótipos em serem mais ou menos sensíveis às variações ambientais. Essa susceptibilidade é conhecida como sensibilidade ambiental (SA) ou plasticidade fenotípica (BRADSHAW, 1965; DE JONG; BIJMA, 2002). De acordo com Falconer (1990), a SA é definida como a

extensão das modificações no fenótipo causadas pelos diferentes ambientes. Essa modificação pode ser mais ou menos expressa, o que leva a indivíduos com maior sensibilidade, chamados de genótipos plásticos, e indivíduos com menor sensibilidade, chamados de genótipos robustos. Portanto, a GxE pode ser descrita como diferenças na sensibilidade ambiental entre os indivíduos (KOMOLDIN, 2003).

Selecionar animais com desempenho semelhante em todos os ambientes pode alterar a sensibilidade ambiental das populações, alcançando maior adaptabilidade genética dos animais e tornando-os mais uniformes em suas produções independentemente do ambiente. Em sistemas de produção onde o ambiente é imprevisível e não pode ser controlado, a estabilidade no desempenho é importante (CECCARELLI, 1994). Porém, genótipos plásticos podem responder mais em ambientes favoráveis, o que pode conferir aumento na média da população se os indivíduos forem expostos a melhores ambientes. Por outro lado, os genótipos plásticos também são mais afetados negativamente em ambientes ruins. Simonelli et al. (2004) alertam para a interpretação adequada da sensibilidade ambiental, visto que em avaliações genéticas pode haver uma tendência em considerar superiores os genótipos que apresentam maior estabilidade adaptativa, o que não significa necessariamente que esses genótipos sejam superiores em todos os ambientes.

No Brasil, estudos recentes sobre sensibilidade ambiental de bovinos de leite vêm sendo realizados por meio de normas de reação em diferentes ambientes, como os realizados por Santos (2020) e Bignardi et al (2015) em vacas Holandesas. Esses estudos permitem identificar rebanhos com variações de sensibilidade ambiental e, conseqüentemente, incluir essas variações adaptativas em índices de seleção para uniformizar o desempenho em diferentes ambientes ou privilegiar genótipos que respondam a melhorias ambientais específicas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Dados

Foram utilizados dados de produção de leite em até 305 dias na primeira lactação (PL305), idade ao primeiro parto (IPP) e genealogia extraídos de um

banco de dados com 328.637 registros, oriundos do Programa de Melhoramento Genético do Girolando (PMGG) em parceria entre a Associação Brasileira de Criadores de Girolando e a Embrapa Gado de Leite, referentes aos anos de 1989 a 2020. Raças puras Holandesa (H), Gir (G) de animais Girolando, oriundos das estratégias de cruzamento (1/4H:3/4G, 3/8H:5/8G, 1/2H:1/2G, 5/8H:3/8G, 3/4H:1/4G, 7/8H:1/8G) compuseram o banco de dados.

Edições no banco de dados foram realizadas para produção de leite (> 0 kg), primeira lactação, idade ao primeiro parto (>540 dias e <1.320 dias) e causas de encerramento da lactação (encerramento por estar próxima ao parto e maior que 250 dias, encerramento por baixa produção, lactação normal e lactação > 350 dias).

Grupos de contemporâneos (GC) para PL305 foram formados por animais nascidos no mesmo rebanho, ano de e época de parto, essa última definida em verão (dezembro, janeiro e fevereiro), outono (março, abril e maio), inverno (junho, julho e agosto) e primavera (setembro, outubro e novembro). Cada GC foi constituído de no mínimo cinco animais, filhas de pelo menos dois touros e padronizado com ± 3 desvios padrão (DP). Para IPP, os GC foram formados por animais nascidos no mesmo rebanho, ano de nascimento e época de nascimento. A estrutura do banco de dados após a edição é resumida na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo da estrutura dos dados para as características de produção de leite em até 305 dias (PL305) e idade ao primeiro parto (IPP) em bovinos da raça Girolando.

Item	Característica	
	PL305	IPP
Número de animais no arquivo de pedigree	212342	212342
Número de touros no arquivo de pedigree	5517	5517
Número de fêmeas no arquivo de pedigree	63092	63092
Animais com registros	60255	56860
Número de grupos de contemporâneos	4395	4243
Média (desvio padrão): PL305(kg); IPP(dias)	5290,6 (2438,61)	974,4(160,44)

4.2. Gradientes ambientais

Para as características PL305 e IPP, os gradientes ambientais foram definidos com base nas soluções padronizadas dos GCs ($\mu=0$; $\sigma^2=1$) obtidas por

meio de análise prévia utilizando o modelo animal, sem considerar a GxE, sendo descrito como:

$$y = X\beta + Za + e,$$

em que y é o vetor de observação fenotípica para PL305 ou IPP; β é o vetor de efeitos fixos referentes às classes de grupo de contemporâneos, número de ordenhas, heterozigosidade, composição genética e efeito linear e quadrático da idade da vaca ao parto como covariável; a é o vetor de efeito aleatório genético aditivo; e é o vetor de efeitos aleatórios para resíduos; e X e Z são matrizes de incidência relacionadas aos efeitos fixos e aleatório genético aditivo, respectivamente. Para IPP não foi considerado o efeito linear e quadrático da idade da vaca ao parto como (co)variável.

As pressuposições acerca da distribuição dos vetores y , a , e e , são descritas como:

$$\begin{bmatrix} y \\ a \\ e \end{bmatrix} \sim \left\{ \begin{bmatrix} X\beta \\ \phi \\ \phi \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} ZGZ' + R & ZG & R \\ GZ & G & \phi \\ R & \phi & R \end{bmatrix} \right\}$$

em que $G=A \otimes G_0$; e $R=I \otimes R_0$, sendo A a matriz de numeradores de coeficiente de parentesco entre os indivíduos, de ordem igual ao número de indivíduos; G_0 e R_0 são matrizes de (co)variâncias genéticas aditivas diretas e de resíduo, respectivamente. Os parâmetros de interesse foram estimados utilizando o método de máxima verossimilhança restrita do software AIREMLF90 (MISZTAL et al., 2002).

Após a edição, os valores mínimos, médios e máximos padronizados dos GA para PL305 foram de -2,88, 0,00, 3,00 desvios padrão, e para IPP foram iguais a -2,70, 0,00, 2,72 desvios padrão, correspondendo aos respectivos efeitos das soluções de GC iguais a 675,34, 5.291,72 e 10.090,98 kg para PL305 e 650, 964 e 1.260 dias para IPP.

4.3. Modelos de norma de reação

Cinco modelos de norma de reação (MNR) foram utilizados para avaliar a sensibilidade genética nos diferentes GA (CARVALHEIRO et al., 2019; CARVALHO FILHO et al., 2022). O primeiro modelo de norma de reação (MNR-hom) aplicado assumiu que os resíduos para os GAs eram homogêneos sendo descrito como:

$$y_{ij} = x'_{ij}\beta + \phi_1\hat{w}_i + b_{0j} + b_{1j}\hat{w}_i + e_{ij},$$

em que y_{ij} é o registro fenotípico do animal j no nível i do GA; β é um vetor de efeitos fixos e x'_{ij} é seu vetor de covariância; ϕ_1 é o coeficiente de regressão linear de y_{ij} em $\hat{w}_i$; $\hat{w}_i$ é efeito estimado do gradiente ambiental; b_{0j} é o efeito genético aditivo global aleatório ou o intercepto do animal j para um GA médio ($\bar{w}=0$); b_{1j} é o efeito genético aditivo aleatório do declive da norma de reação do animal j em $\hat{w}_i$ expresso como um desvio de ϕ_1 ; e e_{ij} é o resíduo aleatório.

O MNR-hom foi ajustado sob as seguintes pressuposições:

$$s = \{b_{0j}, b_{1j}\} \sim N(0, A \otimes \begin{bmatrix} \sigma_{b_0}^2 & \sigma_{b_0, b_1} \\ \sigma_{b_0, b_1} & \sigma_{b_1}^2 \end{bmatrix}) \text{ e } e = \{e_{ij}\} \sim N(0, I\sigma_e^2), \text{ em que } \mathbf{A} \text{ é a matriz}$$

de numeradores de coeficientes de parentesco baseada em informação de pedigree ("⊗" é o produto de Kronecker); $\sigma_{b_0}^2$, $\sigma_{b_1}^2$ e σ_{b_0, b_1} são as variâncias do intercepto, a inclinação e sua covariância, respectivamente; I é uma matriz de identidade e σ_e^2 é a variância residual.

O segundo MNR (MNR-het) foi similar ao MNR-hom, exceto pelo fato de os resíduos serem modelados assumindo variância residual específica para cada GA, usando uma regressão linear em $\hat{w}_i$. Os coeficientes de variância residual heterogêneos para o intercepto e inclinação foram modelados usando uma função *log* residual (FOULLEY; QUASS, 1995).

O terceiro MNR (MNR-q) foi similar ao MNR-het, porém considerando uma regressão polinomial quadrática para modelar a curva fixa e a norma de reação dos efeitos aleatórios (animal e resíduo) em vez de uma regressão linear. MNR-q pode ser descrito pela equação:

$$y_{ij} = x'_{ij}\beta + \phi_1\hat{w}_i + \phi_2\hat{w}_i^2 + b_{0j} + b_{1j}\hat{w}_i + b_{2j}\hat{w}_i^2 + e_{ij},$$

em que ϕ_2 é o coeficiente de regressão fixo quadrático global de y_{ij} em $\hat{w}_i$; $\hat{w}_i^2$ é o valor ao quadrado de $\hat{w}_i$; b_{2j} é o efeito quadrático do efeito genético aditivo aleatório da norma de reação do animal j em $\hat{w}_i$ expresso como um desvio de ϕ_2 ; e todos os outros termos conforme especificado anteriormente.

Para os outros dois MNR também foram assumidos variâncias residuais heterogêneas e foram utilizadas uma função spline linear-linear (MNR_l-l) e uma quadrática-quadrática (MNR_q-q) para modelar a curva fixa e a norma de reação

dos efeitos aleatórios genéticos e residuais. Para ambas as funções spline, foi utilizado um nó (k) no GA médio ($k = 0$). MNR_I-I pode ser descrito pela equação:

$$y_{ij} = x'_{ij}\beta + \phi_1 \hat{w}_i + \phi_1^* \hat{w}_i^* + b_{0j} + b_{1j} \hat{w}_i + b_{1j}^* \hat{w}_i^* + e_{ij},$$

em que, ϕ_1^* é a diferença global entre os coeficientes de regressão linear fixos do primeiro e segundo segmentos da função spline linear-linear de y_{ij} em $\hat{w}_i^*$ ($\hat{w}_i^* = 0$ if $\hat{w}_i < k$; $\hat{w}_i^* = \hat{w}_i$ if $\hat{w}_i \geq k$); b_{1j}^* é a diferença entre as inclinações da norma de reação do primeiro e do segundo segmentos da função spline linear-linear do efeito genético aditivo aleatório do animal j em $\hat{w}_i^*$ expresso como desvio de ϕ_1^* ; e todos os outros termos conforme especificado anteriormente. Com esta parametrização do modelo, as estimativas da inclinação do segundo segmento (b_{1seg2j}) foram obtidas por: $b_{1seg2j} = b_{1j} + b_{1j}^*$.

MNR_q-q pode ser descrito pela equação:

$$y_{ij} = x'_{ij}\beta + \phi_1 \hat{w}_i + \phi_2 \hat{w}_i^2 + \phi_1^* \hat{w}_i^* + \phi_2^* \hat{w}_i^{2*} + b_{0j} + b_{1j} \hat{w}_i + b_{2j} \hat{w}_i^2 + b_{1j}^* \hat{w}_i^* + b_{2j}^* \hat{w}_i^{2*} + e_{ij},$$

em que, ϕ_2^* é a diferença global entre os coeficientes de regressão fixa quadrática do primeiro e segundo segmentos da função spline quadrática-quadrática de y_{ij} em $\hat{w}_i^{2*}$ ($\hat{w}_i^{2*} = 0$ if $\hat{w}_i < k$; $\hat{w}_i^{2*} = \hat{w}_i^2$ if $\hat{w}_i \geq k$); b_{2j}^* é a diferença entre os efeitos quadráticos da norma de reação do primeiro e segundo segmentos da função spline quadrática-quadrática do efeito genético aditivo aleatório do animal j em $\hat{w}_i^*$ expresso como um desvio de ϕ_2^* ; e todos os outros termos conforme especificado anteriormente. Com esta parametrização do modelo, as estimativas do efeito quadrático do segundo segmento (b_{2seg2j}) serão obtidas por: $b_{2seg2j} = b_{2j} + b_{2j}^*$. MNR quadrático (MNR_q e MNR_q-q) foram utilizados para avaliar qualquer vantagem em comparação com as normas de reação linear.

Funções spline MNR (MNR_I-I e MNR_q-q) foram utilizadas para avaliar se a sensibilidade ambiental no primeiro segmento (GA desfavorável a intermediário) está correlacionada com a sensibilidade ambiental no segundo segmento (GA intermediário a favorável). As estimativas dos componentes de (co)variância de todos os MNR foram obtidas por máxima verossimilhança restrita usando o software AIREMLF90 (MISZTAL et al., 2002).

A comparação e escolha do melhor modelo se deu com base nos critérios de informação de Akaike (AIC) utilizando a equação Burnham & Anderson, (2004) podendo ser descrita como:

$$AIC = n \log(\sigma^2) + 2K,$$

onde

$$\sigma^2 = \frac{\sum(\hat{e}_i)^2}{n}$$

e o $\hat{e}_i$ são os resíduos estimados do modelo ajustado. Nesse caso, k deve ser o número total de parâmetros do modelo, incluindo o intercepto e σ^2 e Bayesiano (BIC) Schwarz, (1978). Vale ressaltar que a plausibilidades nas estimativas dos componentes de variância também foi levada em consideração para que se pudesse escolher o modelo mais adequado.

Foram classificados os genótipos dos animais de composição racial 5/8H:3/8G e 3/4H:1/4G de acordo com os valores absolutos de inclinação (b_j) e dos desvios padrão da inclinação da característica (σ_b) em: robusto ($|b_j| < \sigma_b$), plástico ($\sigma_b \leq |b_j| < 2\sigma_b$) e extremamente plástico ($|b_j| \geq 2\sigma_b$) (SANTANA et al., 2016). As correlações de Spearman foram estimadas entre os valores genéticos preditos para os ambientes desfavoráveis, intermediários e favoráveis para identificar a ocorrência de reclassificação dos animais, em maior ou menor grau.

5. RESULTADOS

5.1. Critérios para o ajuste dos modelos

Os modelos heterocedásticos apresentaram melhores ajustes em comparação com o modelo homocedástico para PL305 e IPP, conforme indicado pelos critérios AIC e BIC (Tabela 02). Isso sugere que a suposição da *heterogeneidade da variância residual levou a melhores ajustes dos MNR's*. Entre os modelos heterocedásticos, os modelos quadráticos (MNR_q) e spline (MNR_l-l e MNR_q-q) apresentaram melhor qualidade de ajuste do que o (MNR_het), o que indica haver uma não linearidade no MNR para PL305 e IPP. De modo geral, independentemente do critério adotado (AIC e BIC) o MNR_q-q teve o melhor ajuste para ambas as características.

5.2. Componentes de variância e parâmetros genéticos

As correlações entre intercepto e inclinação para os modelos lineares (MNR_hom e MNR_het) foram altas para PL305 (0,99 e 0,81) e de alta a moderada para IPP (0,93 e 0,61), respectivamente (Tabela 2), o que demonstrou que animais com melhores EBVs no ambiente intermediário, tendem a apresentar maior sensibilidade à variação ambiental também. As estimativas de correlação para o modelo MNR_I-I entre intercepto e inclinação sugerem que essa associação é forte e proporcional (0,77) no primeiro segmento (GA desfavorável a intermediário) e moderada e inversamente proporcional (-0,56) entre intercepto e inclinação do segundo segmento (GA intermediário a favorável) e entre inclinações do primeiro e segundo segmento (-0,43), demonstrando uma diferença no padrão de sensibilidade ambiental do primeiro e segundo segmento para PL305 (Tabela 2).

Para IPP, as estimativas de correlações entre intercepto e inclinação para o modelo MNR_I-I também sugerem modificação no padrão de variação dos genótipos entre o primeiro e segundo segmento da MNR. Para os dois segmentos as estimativas de correlações foram altas, contrastando em grandezas proporcionais no primeiro segmento (0,80) para intercepto e inclinação e inversamente proporcionais entre intercepto e inclinação do segundo segmento (-0,85) e entre as inclinações do primeiro e segundo seguimento (-0,82) (Tabela 02).

A variância genética aditiva teve aumento do ambiente desfavorável para o favorável entre todos os modelos para PL305 (Figura 1 - A). Para IPP, entre os modelos quadráticos (MNR_q e MNR_q-q) as variâncias genéticas aditivas foram maiores no ambiente favorável ($GA < -2$) e tenderam a cair no ambiente desfavorável ($GA > 2$) (Figura 1 - C). As oscilações da variância genética aditiva entre os gradientes resultaram em estimativas de herdabilidade com magnitude semelhante para PL305 (0,16, 0,14) e IPP (0,11, 0,10) para MNR_hom e MNR_het, respectivamente. As estimativas de herdabilidade pelo MNR_hom para PL305 indica que ao assumir homocedasticidade, parte da variância residual foi estimada como variância genética aditiva, ocasionando sub e superestimação da herdabilidade nos ambientes desfavorável e favorável, respectivamente. Todavia, para IPP as estimativas de herdabilidade foram

superestimadas no ambiente desfavorável e subestimadas no ambiente favorável (Figura 2).

Tabela 2 – Estimativas de variância (na diagonal), covariância (na parte superior triangular em itálico) e correlação (na parte inferior triangular em negrito) entre os coeficientes dos modelos de norma de reação (MNR) para efeito genético aditivo para as características de produção de leite em até 305 dias (PL305) e idade ao primeiro parto (IPP) em bovinos da raça Girolando, com estimativas de variância residual correspondentes, critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC).

Característica ¹	Modelos ²	Coeficiente ³	b0	b1	b2	b3	σ_e^2 ⁴	np ⁵	AIC	BIC
PL305	RNM_hom	b0 (int)	538.520,0	129.910,00			27.13900	4	1.002.953,80	1.002.963,92
		b1 (slp)	0,99	32.023,00						
	RNM_het	b0 (int)	2.713.900,00	58.277,00			14,82	5	1.002.807,20	1.002.821,10
		b1 (slp)	0,81	11.431,00			0,11			
	RNM_q	b0 (int)	558.750,00	25.775,00	-78.649,00		14,92			
		b1 (slp)	0,15	51.568,00	14.192,00		0,13	9	1.002.152,20	1.002.177,22
		b2 (qdr)	-0,76	0,45	19059,00		-0,15			
	RNM_I-I	b0 (int)	448.290,00	82.378,00	-26.402,00		15,02			
		b1 (slp1)	0,77	25.855,00	-4.903,80		0,42	9	1.002.317,30	1.002.342,32
		b2 (slp2)	-0,56	-0,43	5.047,20		-0,57			
	RNM_q-q	b0 (int)	530.620,00	109.050,00	-34.810,00	-70.265,00	14,91			
		b1 (slp1)	0,25	348.940,00	132.610,00	-282.260,00	0,02	14	1.002.093,70	1.002.132,62
		b2 (qdr1)	-0,19	0,88	64.681,00	-111.390,00	-0,22			
		b3 (qdr2)	-0,20	-0,97	-0,89	243.720,00	0,16			
IPP	RNM_hom	b0 (int)	1.718,80	211,24			14000,00	4	665.338,64	665.349,66
		b1 (slp)	0,93	30,31						
	RNM_het	b0 (int)	1.554,90	118,11			9,56	5	665.306,91	665.320,68
		b1 (slp)	0,61	24,19			0,05			
	RNM_q	b0 (int)	2025,30	173,30	-284,70		9,72	9	663946,00	663970,79

	b1 (slp)	0,42	85,06	-29,85		-0,09		
	b2 (qdr)	-0,89	-0,46	49,99		-0,23		
RNM_I-I	b0 (int)	1.849,10	375,27	-486,09		9,85		
	b1 (slp1)	0,80	120,01	-118,83		0,43	9	664.205,02
	b2 (slp2)	-0,85	-0,82	176,71		-0,86		664.229,81
RNM_q-q	b0 (int)	2.004,90	397,30	-177,94	-278,06	9,71		
	b1 (slp1)	0,22	1.593,00	665,96	-1.267,30	0,02		
	b2 (qdr1)	-0,21	0,88	362,55	-556,16	-0,21	14	663.919,25
	b3 (qdr2)	-0,19	-0,98	-0,91	1.040,90	-0,06		663.957,82

¹ PL305: Produção de leite em até 305 dias; IPP: Idade ao primeiro parto

² MNR_hom: linear homecedástico; MNR_het: linear heterocedástico; MNR_q: quadrático heterocedástico; MNR_I-I: spline linear-linear heterocedástico; MNR_q-q: spline quadrático-quadrático heterocedástico

³ b0 – b3: coeficientes do MNR para o efeito aleatório genético aditivo [int: intercepto; slp: inclinação; qdr: quadrático; slp1(2): inclinação do segmento; qdr1(2): quadrático do segmento

⁴ Variância residual (MNR_hom) ou coeficientes residuais associados aos parâmetros do MNR heterocedásticos que foram modelados usando uma função log-residual (FOULLEY; QUAAS, 1995)

⁵ Número de parâmetros estimados

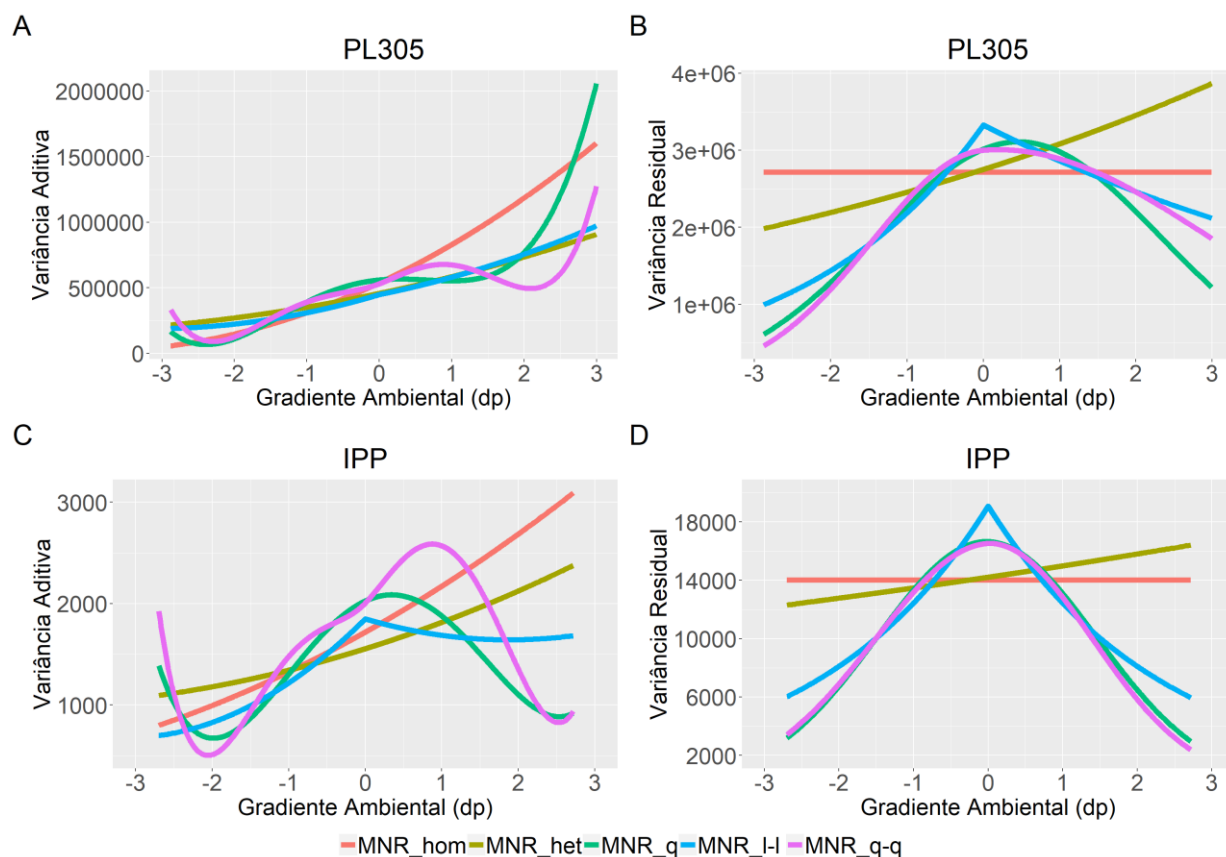


Figura 1 - Variância genética aditiva (A-C) e variância residual (B-D) para produção de leite em até 305 dias (PL305) e idade ao primeiro parto (IPP) de bovinos da raça Girolando de acordo com o gradiente ambiental, para diferentes modelos de normas de reação. MNR_hom: linear homecedástico; MNR_het: linear heterocedástico; MNR_q: quadrático heterocedástico; MNR_I-I: spline linear-linear heterocedástico; MNR_q-q: spline quadrático-quadrático heterocedástico.

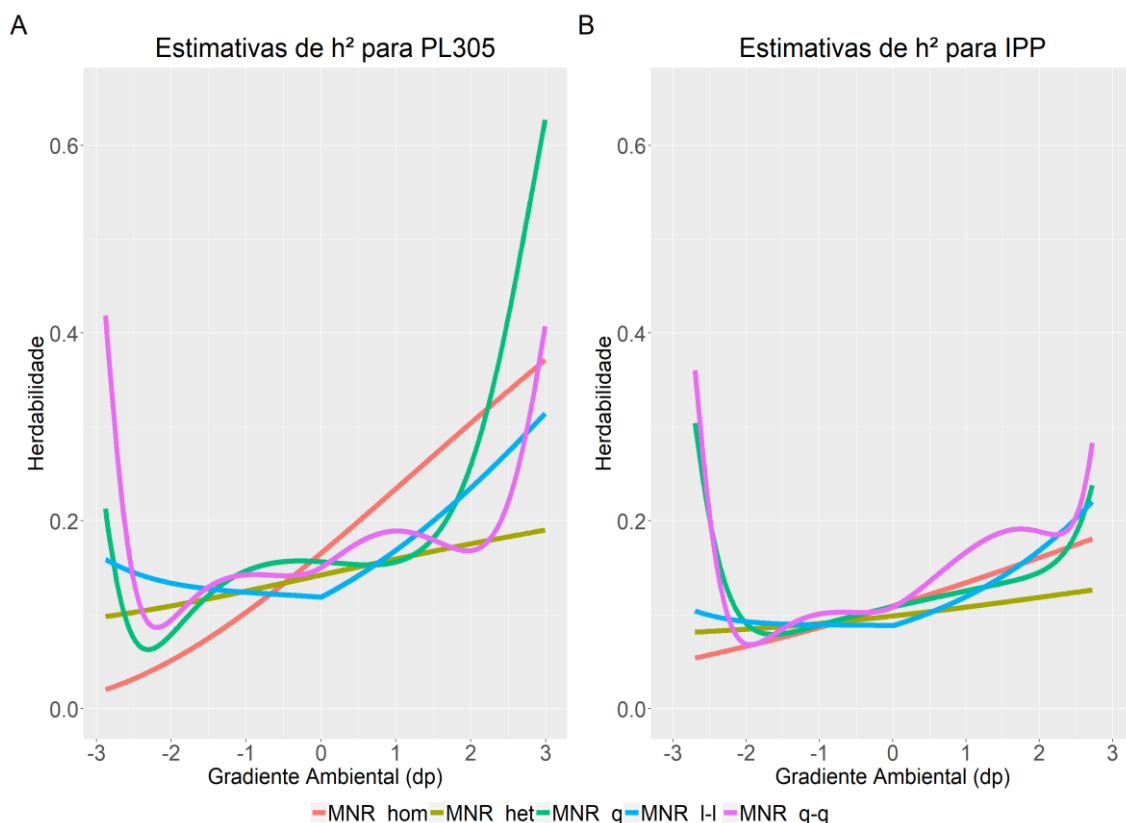


Figura 2 – Estimativas de herdabilidade (h^2) para produção de leite em até 305 dias (PL305 – A) e idade ao primeiro parto (IPP – B) de bovinos da raça Girolando de acordo com o gradiente ambiental, para diferentes modelos de normas de reação. MNR_hom: linear homecedástico; MNR_het: linear heterocedástico; MNR_q: quadrático heterocedástico; MNR_I-I: spline linear-linear heterocedástico; MNR_q-q: spline quadrático-quadrático heterocedásticos.

Para os modelos MNR_het e MNR_I-I, foram observadas estimativas médias de herdabilidade de 0,14 para PL305 e 0,10 para IPP (Tabela 3). No entanto, verificou-se que o segundo segmento (GA 0 a 3) do MNR_I-I apresentou inclinação positiva mais aguda para as estimativas de herdabilidade, podendo ser explicado pelo comportamento linear decrescente da variância residual (Figura 1 - B-D), o que não ocorreu com o MNR_het para o mesmo GA, explicando dessa forma a amplitude menor das estimativas de herdabilidade desse modelo para as características em questão. As estimativas de herdabilidade para os modelos MNR_q e MNR_q-q foram superestimadas nos gradientes extremos para PL305 e IPP. Para PL305 o modelo MNR_q *apresentou maiores estimativa de herdabilidade para $GA \geq 2,5$* e MNR_q-q *apresentou maiores estimativas de herdabilidade para $GA \leq -2,5$* . A IPP teve as

estimativas de herdabilidade maiores geradas pelo MNR_q-q para $GA \leq -2,5$ e $GA \geq 2,5$ (Figura 2).

Tabela 03 – Estimativas médias (mínimo e máximo) de herdabilidade para produção de leite em até 305 dias (PL305) e idade ao primeiro parto (IPP) em bovinos da raça Girolando para diferentes modelos de norma de reação.

Modelos ¹	Características	
	PL305	IPP
<i>RNM_hom</i>	0,16 (0,02-0,37)	0,11 (0,05-0,18)
<i>RNM_het</i>	0,14 (0,09-0,19)	0,10 (0,08-0,13)
<i>RNM_q</i>	0,16 (0,06-0,63)	0,11 (0,07-0,30)
<i>RNM_I-I</i>	0,14 (0,11-0,31)	0,10 (0,08-0,22)
<i>RNM_q-q</i>	0,15 (0,08-0,42)	0,12 (0,07-0,36)

¹ MNR_hom: linear homecedástico; MNR_het: linear heterocedástico; MNR_q: quadrático heterocedástico; MNR_I-I: spline linear-linear heterocedástico; MNR_q-q: spline quadrático-quadrático heterocedástico

5.3. Sensibilidade ambiental para os valores genéticos dos touros

As estimativas de herdabilidade do MNR_hom resultaram em redução excessiva dos valores genéticos preditos (EBVs) dos touros no $GA = -3$, enquanto o oposto foi observado para o $GA = +3$, em comparação com os EBVs pelos modelos heterocedásticos para PL305 (Figura 3 - B) e IPP (Figura 4 – B). De acordo com as estimativas dos componentes de (co)variância e os resultados da comparação entre os modelos, a importância do componente não linear foi reforçado para os MNR_q, MNR_I-I e MNR_q-q em ambas as características em bovinos Girolando (Figuras 3 e 4).

A superestimação das herdabilidade nos ambientes extremos para MNR_q e MNR_q-q, fez com que os EBVs fossem superestimados no $GA < -2$ para IPP e $GA > 2$ para PL305, demonstrando que a utilização do modelo MNR_I-I para uma investigação mais aprofundada no presente estudo foi a mais plausível. De modo geral, diferentes modelos podem fornecer classificações de EBV distintas entre os animais, principalmente em GA mais acentuados (Figuras 5).

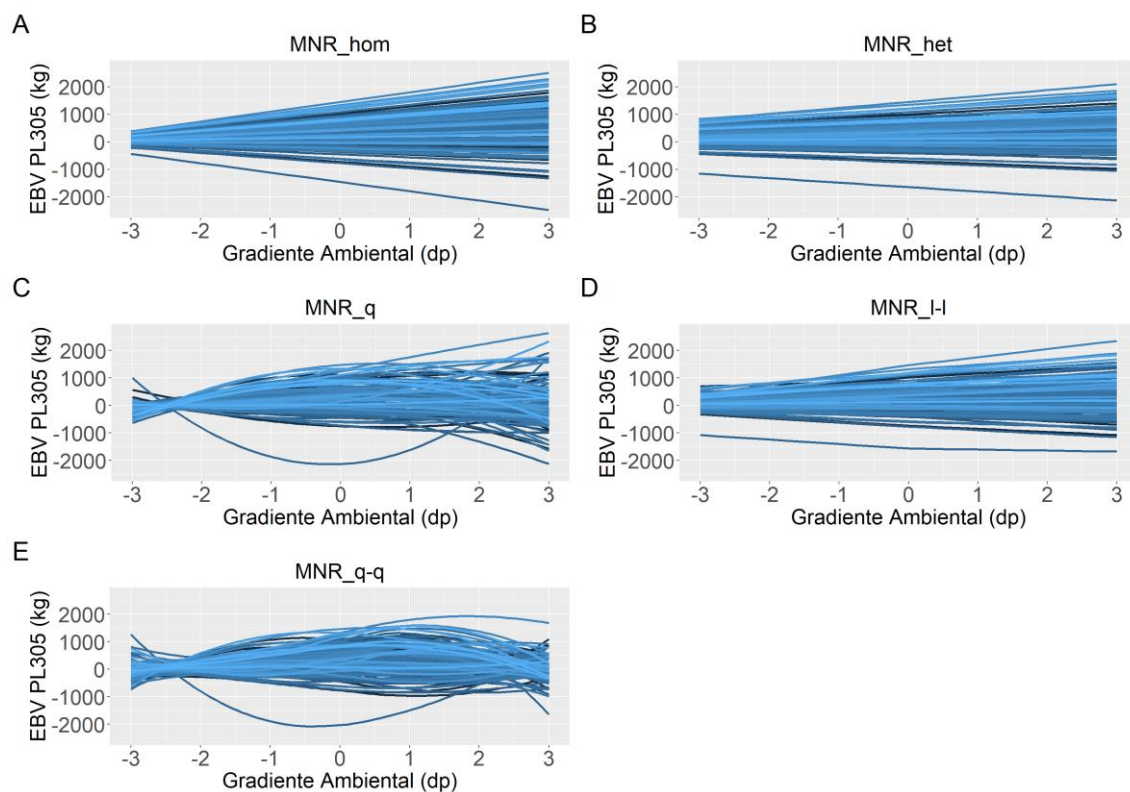


Figura 3 - Estimativas dos valores genéticos (EBV) para produção de leite em até 305 dias (PL305) de bovinos da raça Girolando de acordo com o gradiente ambiental, para diferentes modelos de normas de reação. MNR_hom: linear homecedástico; MNR_het: linear heterocedástico; MNR_q: quadrático heterocedástico; MNR_I-I: spline linear-linear heterocedástico; MNR_q-q: spline quadrático-quadrático heterocedástico. A-E Normas de reação de touros com pelo menos 25 progênes (n = 121).

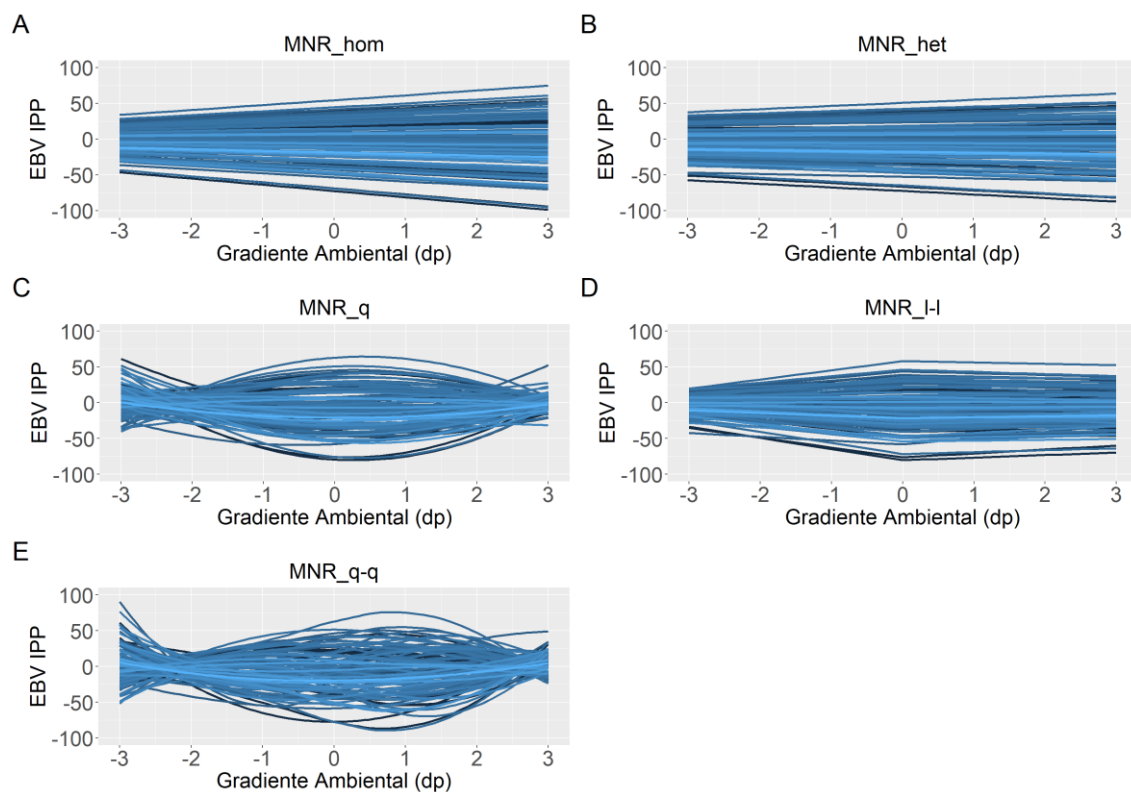


Figura 4 - Estimativas dos valores genéticos (EBV) para idade ao primeiro parto (IPP) de bovinos da raça Girolando de acordo com o gradiente ambiental, para diferentes modelos de normas de reação. MNR_hom: linearar homecedástico; MNR_het: linear heterocedástico; MNR_q: quadrático heterocedástico; MNR_l-l: spline linear-linear heterocedástico; MNR_q-q: spline quadrático-quadrático heterocedástico. A-E Normas de reação de touros com pelo menos 25 progênies (n = 114).

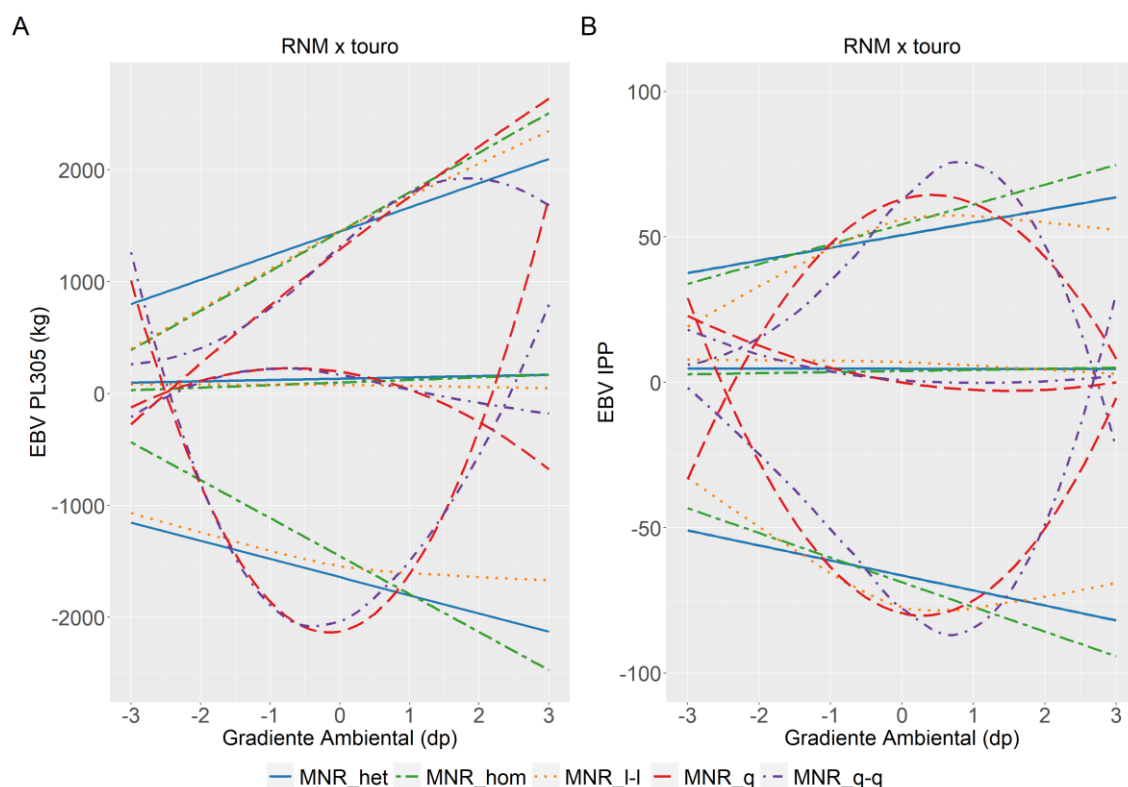


Figura 5 - Estimativas dos valores genéticos (EBV) de três touros selecionados para produção de leite em até 305 dias (PL305) e idade ao primeiro parto (IPP) de bovinos da raça Girolando de acordo com o gradiente ambiental, para diferentes modelos de normas de reação. MNR_hom: linear homecedástico; MNR_het: linear heterocedástico; MNR_q: quadrático heterocedástico; MNR_I-I: spline linear-linear heterocedástico; MNR_q-q: spline quadrático-quadrático heterocedástico.

Para os EBVs dos 10 melhores touros selecionados nos ambientes desfavoráveis, intermediário e favorável, foi observado uma reorganização ao longo do GA, principalmente quando a estratégia de seleção foi a dos EBVs no gradiente desfavorável e favorável para PL305 e IPP (Figuras 6-7). Quando a estratégia de seleção foi baseada na variação do EBV, ou seja, os 10 melhores touros robustos, observou-se menor reclassificação dos touros no GA para as duas características (Figuras 6-7 – D).

Em relação a classificação dos touros, as estimativas das correlações de Spearman obtidas apontam para maior reclassificação dos touros entre os ambientes desfavorável e favorável para PL305 e IPP (Figura 8 B-D). No entanto, entre ambientes desfavorável e intermediário e favorável e intermediário, foi observado alta correlação de Spearman em ambas as características.

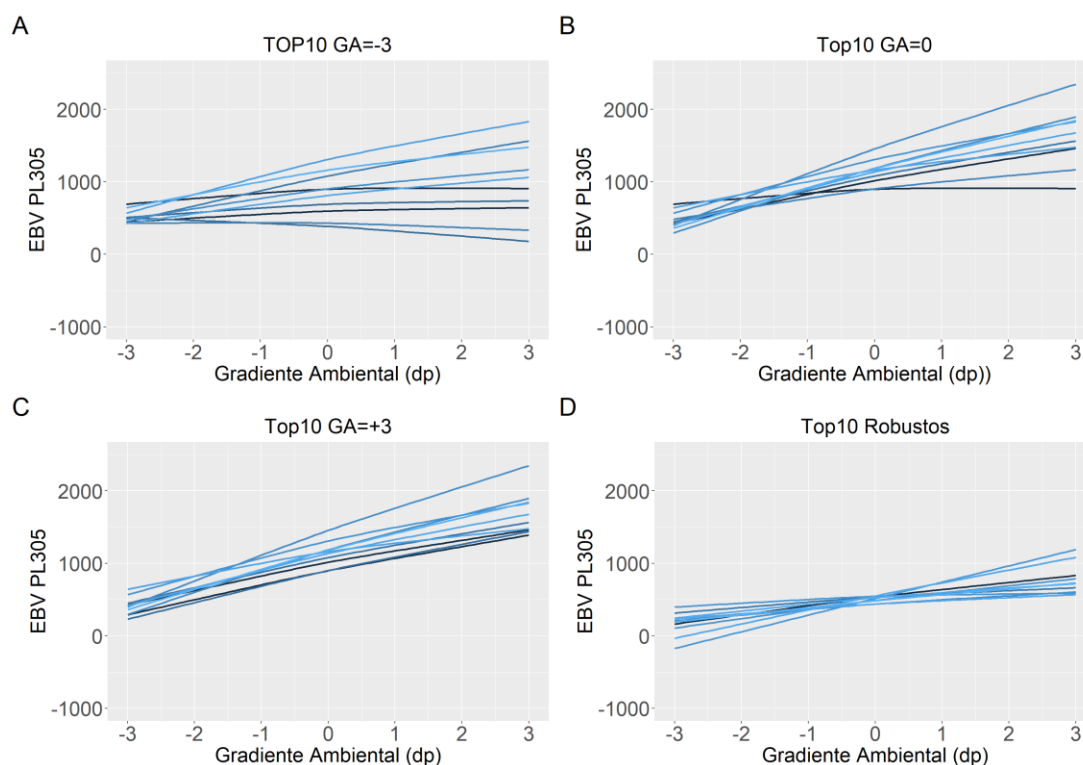


Figura 6 - Estimativas dos valores genéticos (EBV) para produção de leite em até 305 dias (PL305) de touros Girolando classificados como os 10 melhores para o ambiente desfavorável (A), intermediário (B), favorável (C) e os 10 mais robustos (D) considerando o modelo de norma de reação spline linear-linear heterocedástico (MNR_I-I).

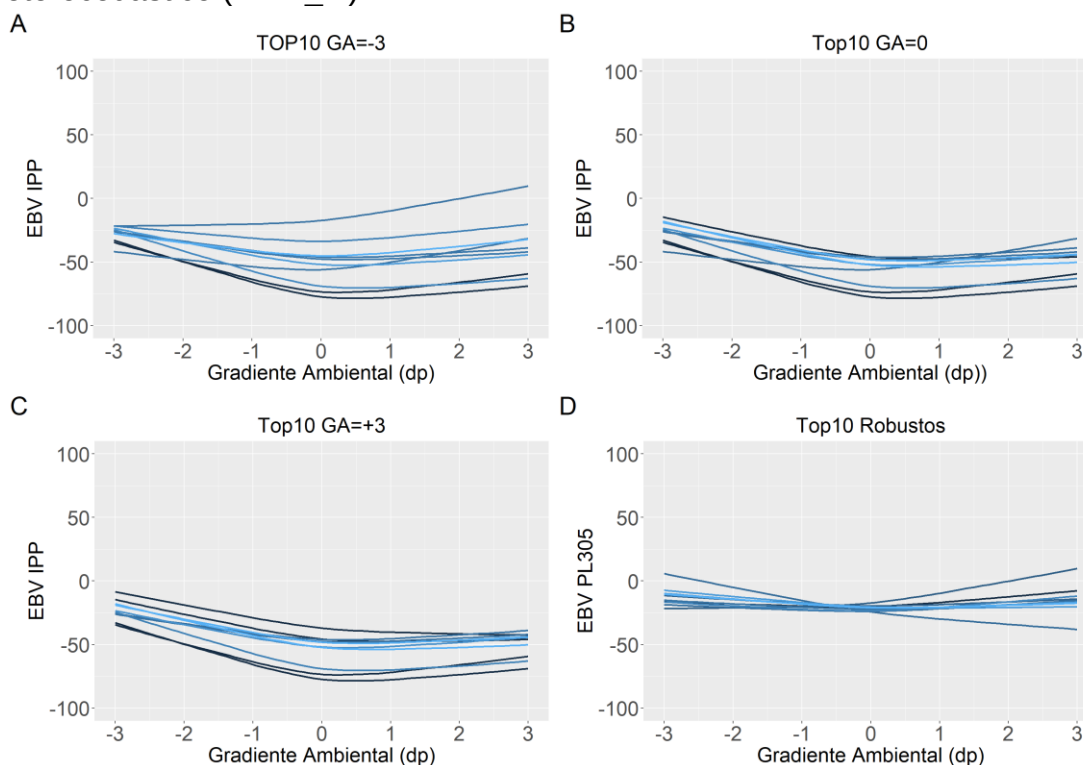


Figura 7 - Estimativas dos valores genéticos (EBV) para idade ao primeiro parto (IPP) de touros Girolando classificados como os 10 melhores para o ambiente desfavorável (A), intermediário (B), favorável (C) e os 10 mais robustos (D)

considerando os modelos de norma de reação spline linear-linear heterocedástico (MNR_I-I).

O valor do EBV obtido a partir do modelo RNM_I-I para PL305 e IPP indicou que a sensibilidade à variação ambiental do GA desfavorável a intermediário (-3 a 0) não foi correlacionada com a sensibilidade do GA intermediário a favorável (0 a 3) (FIGURA 8 A-C). As estimativas de correlação genética dos animais entre os ambientes desfavorável e favorável ao longo do gradiente ambiental apresentaram declínio, sendo mais acentuadas entre o ambiente desfavorável e *favorável no* $GA \leq -1$ e $GA \geq -1$ para PL305 e IPP, o que reforça a GxE para essas características ao longo do GA.

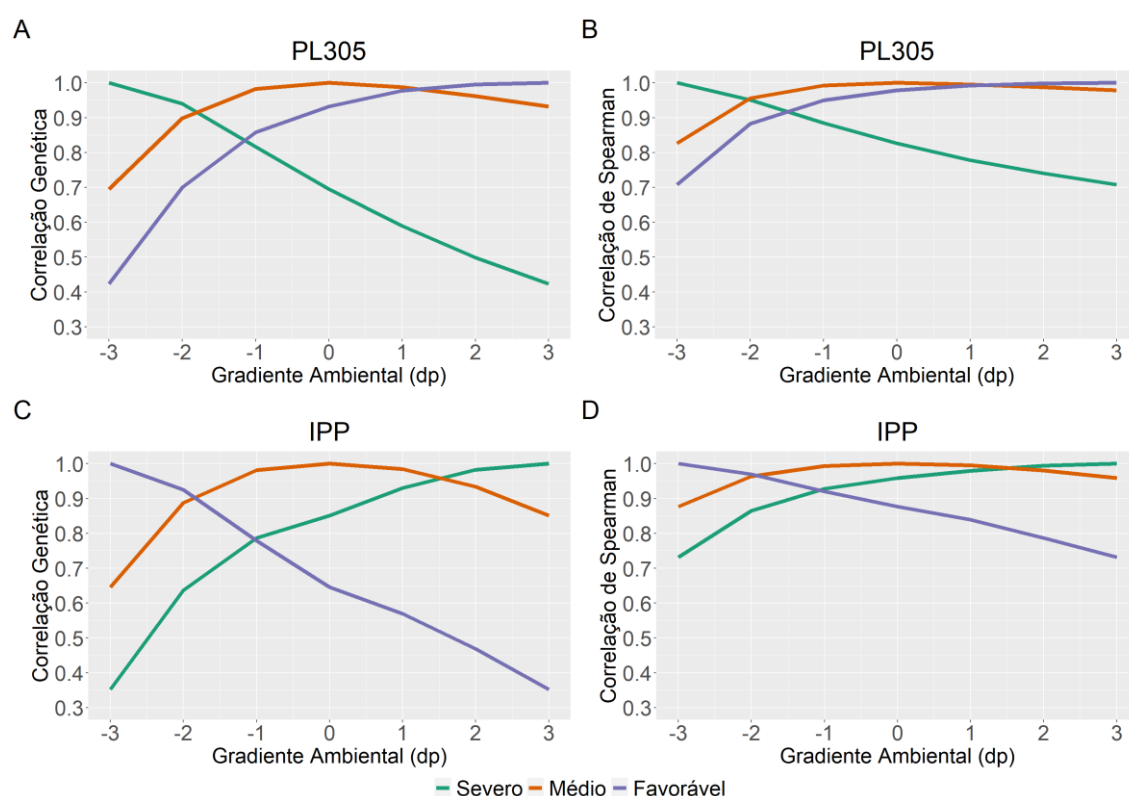


Figura 8 - Estimativas de correlação genética e correlação de Spearman entre os valores genéticos estimados (EBVs) do touro entre os ambientes desfavorável, intermediário e favorável considerando o modelo de norma de reação spline linear-linear heterocedástico (MNR_I-I) para produção de leite em até 305 dias (PL305 A-B) e idade ao primeiro parto (IPP C-D), respectivamente.

Para MNR_I-I o percentual de animais robustos, plásticos e extremamente plásticos para PL305 foram de 66,7%, 29,6% e 3,7%. Já IPP apresentou de 68% e 32% de classificação para animais robustos e plásticos respectivamente

(Figura 9). Para as duas características, houve predominância de animais robustos de acordo com o critério adotado.

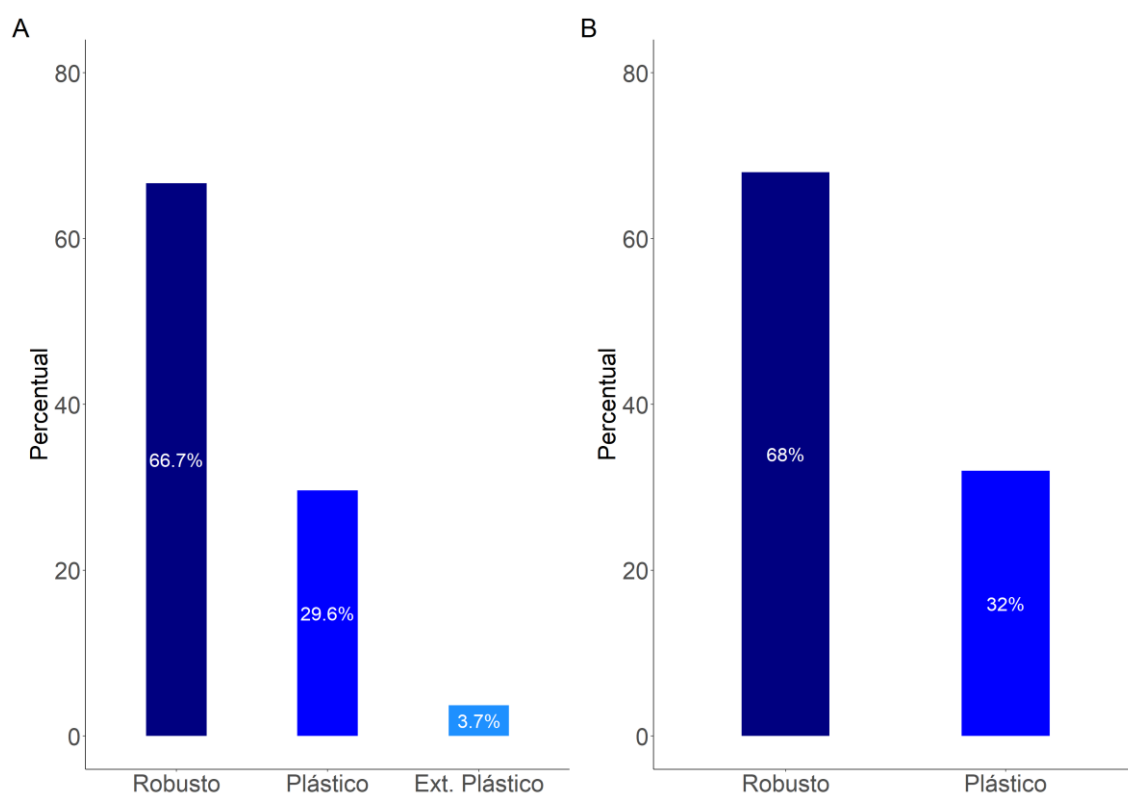


Figura 9 – Classificação dos genótipos de acordo com a sensibilidade para produção de leite em até 305 dias (A) e idade ao primeiro parto (B) considerando o modelo de norma de reação spline linear-linear heterocedástico (MNR_I-I).

6. DISCUSSÃO

6.1. Modelos de norma de reação

A comparação dos ajustes dos modelos foi baseada nos critérios de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC). Além de AIC e BIC, foram levadas em considerações as estimativas das herdabilidade, valores genéticos estimados (EBVs) nos GA e sensibilidade ambiental. Quanto a adoção dos descritores ambientais baseados nas soluções dos grupos de contemporâneos (GC) neste estudo, Carvalheiro et al., (2019), Carvalho Filho et al., (2022) e Daltro et al., (2022) apontaram que a *utilização do MNR “dois passos”* (quando se lança mão de uma análise prévia por meio de um modelo animal padrão, para estimar os GA a partir dos desvios dos GC), alcança ajustes semelhantes a metodologia de passo único (GA estimado simultaneamente com os outros parâmetros no MNR), onde os efeitos

dos GC são covariáveis desconhecidas no MNR. Além disso, a utilização do modelo de passo único aumentaria significativamente o tempo computacional necessário para as análises.

Com relação a heterogeneidade de variância residual, todos os modelos heterocedásticos tiveram melhor ajuste quando comparados ao modelo homocedástico para PL305 e IPP, o que demonstra que a ausência da heterogeneidade de variância, tem impacto nas estimativas dos valores genéticos, sobretudo em rebanhos com maior pressão de seleção (CARVALHEIRO et al., 2002; ARAÚJO et al., 2009; ARAÚJO; CRISTINA; CALMON, 2011;). Considerar a heterogeneidade da variância residual entre os ambientes é importante para modelar a variação dos valores genéticos (KOLMODIN et al., 2002; MOTA et al., 2016). Além disso, a utilização da heterogeneidade da variância residual melhora a distribuição da variância fenotípica em componentes genéticos e ambientais, o que possibilita um aumento na resposta a seleção (CARDOSO et al., 2011; CARVALHO FILHO et al., 2022).

Encontrar o melhor modelo é uma tarefa difícil, e diferentes critérios podem não indicar o mesmo modelo (DALTRO et al., 2022). Assim como em Carvalho Filho et al., (2022) os modelos spline e quadrático foram o que apresentaram melhor ajuste em relação ao modelo RNM_het de acordo com AIC e BIC para PL305 e IPP, o que sugere a existência de um componente não linear. Carvalheiro et al., (2019) afirmaram que essa não linearidade indica que a sensibilidade dentro de animal depende do nível do GA e que os animais podem apresentar diferentes padrões de sensibilidade dependendo do grau do GA. Os MNR_q e MNR_q-q superaram o MNR_I-I, porém, apesar dos melhores ajustes para esses modelos, esses tendem a superestimar a herdabilidade em GAs extremos, o que nos levou a recomendação do MNR_I-I pela qualidade do ajuste e plausibilidade das estimativas de herdabilidade.

6.2. Herdabilidade

As estimativas de herdabilidade obtidas no presente estudo para PL305 e IPP em bovinos da raça Girolando foram diferentes ao longo do GA, devido as variações nos componentes de variância genético aditivo e residual (esse último

não se aplica ao MNR_hom) como função do GA. Bignardi et al., (2015) também observaram variações nas estimativas de herdabilidade ao longo do GA para produção de leite acumulada em 305 dias em bovinos da raça Holandesa. As estimativas de herdabilidade aumentaram gradualmente conforme o ambiente foi se tornando favorável para PL305, exceto para MNR_q-q, isso demonstra que animais com valores genéticos elevados para essa característica, tendem a responder as melhorias ambientais. Daltro et al., (2022) observaram aumento gradativo nas estimativas de herdabilidade para produção de leite no dia do teste em bovinos da raça Girolando com a melhoria do GA nos MNR, e afirmaram que essa situação possibilita ganhos genéticos na seleção e uso de genótipos em ambientes de manejo médio e alto. Ou seja, é observado um aumento na expressão do potencial genético dos animais sob ambientes mais bem manejados (BIGNARDI et al., 2015).

Para IPP, maiores estimativas de herdabilidade foram verificadas nos ambientes mais desfavorável para os modelos lineares e MNR_I-I. Santos, (2022), utilizando modelos de normas de reação em *“dois passos”* também observou comportamento similar para as estimativas das herdabilidades para IPP em bovinos da raça Guzerá, e atribui isso à semelhança dos valores genéticos em ambientes mais bem manejados, resultando em uma menor variabilidade genética.

As estimativas de herdabilidade para IPP foram menores nos ambientes favoráveis, contrariando as estimativas encontradas por Chiaia et al., (2015) e Lemos et al., (2015) em bovinos da raça Nelore. Segundo os autores, a diferença genética aditiva entre os animais aumenta à medida que o ambiente se torna mais favorável. No entanto, Araujo Neto et al., (2018) obtiveram estimativas de herdabilidade para IPP menores para bovinos da raça Nelore ao longo do GA em comparação com os trabalhos supracitados, e atribuíram essa diferença a utilização de diferentes rebanhos e nas definições dos gradientes ambientais.

A definição do gradiente ambiental tem uma forte influência nas estimativas dos componentes de variância (CALUS; BIJMA; VEERKAMP, 2004). No presente estudo, a IPP foi utilizada como critério para avaliar os níveis ambientais para essa característica, o que diverge de Chiaia et al., (2015) e Lemos et al., (2015), que utilizaram o ganho de peso pós-desmama como gradiente ambiental.

De modo geral, as estimativas de herdabilidade para MNR_q foram superestimadas nos ambientes extremos para PL305 e IPP. Para MNR_{q-q}, mesmo com a utilização de spline que, de acordo com (MEYER, 2005) favorecem a robustez nos gradientes mais extremos e produzem estimativas mais consistentes e precisas, as herdabilidades também foram superestimadas, o que pode estar relacionado ao menor número de fenótipos nesses gradientes (CARVALHO FILHO et al., 2022).

6.3. Sensibilidade Ambiental

As estimativas de correlações genéticas entre intercepto e a inclinação para as características de PL305 e IPP para todos os modelos foram de magnitude alta a moderada, apresentando comportamento inverso entre primeiro e segundo segmento, o que indica uma reordenação dos valores genéticos em diferentes ambientes (SANTANA et al., 2015). Correlações genéticas altas, indicam que animais com valores genéticos médios a altos tendem a responder melhor à melhoria das condições ambientais o que caracteriza o efeito de escala (SANTANA et al., 2013). No contexto da seleção, é relevante considerar essas correlações entre intercepto e inclinação, pois podem influenciar a eficácia da seleção e o ranking dos animais com base nos índices utilizados. Se o efeito de escala diferir entre as características incluídas em um índice, a importância relativa dessas características pode ser alterada, levando a mudanças no ranking dos animais com base no índice.

Carvalho et al., (2019) relataram altas correlações genéticas entre intercepto e a inclinação do MNR_{het} para ganho de peso pós-desmama em bovinos da raça Nelore, sugerindo pouca oportunidade de seleção conjunta para o aumento de desempenho e a redução da sensibilidade. Em um sistema de produção ideal, a seleção de animais seria direcionada para aqueles que apresentam altos níveis de desempenho produtivo e baixa sensibilidade às variações ambientais, ou seja, animais mais robustos, com nível de inclinação próximo de zero (DALTRO et al., 2022). Animais com uma inclinação mais sutil são menos sensíveis às variações ambientais (NEGRI et al., 2021).

Com a utilização das normas de reação, a robustez e a plasticidade podem ser consideradas como metas adicionais de seleção para gerar opções de touros

generalistas ou especialistas (PÉGOLO et al., 2009). De acordo com Carvalheiro et al., (2019), uma alternativa para a seleção de animais mais robustos e com produtividade elevada seria através da identificação do melhor genótipo para condições ambientais específicas. Contudo, essa estratégia pode fornecer ganho genético reduzido, especialmente para sistemas onde as condições ambientais variam substancialmente ao longo dos anos. Isso reforça a relevância do uso da sensibilidade como critério de seleção (JONG; BIJMA, 2002). Assim como em Santana et al., (2013); Ambrosini et al., (2016); Carvalho Filho et al., (2022); Daltro et al., (2022) que relataram maior proporção de animais robustos para as características que investigaram, neste estudo foram identificados maior proporção de animais robusto para PL305 e IPP. A utilização de genótipos robustos deve ser feita com cautela, pois alguns estudos indicam que esses genótipos tendem a ser menos produtivos (AMBROSINI et al., 2014; CARDOSO & TEMPELMAN, 2012).

O comportamento da curva dos 10 melhores touros selecionados em cada GA reforça a presença de GxE para PL305 e IPP evidenciando a reordenação. Ao identificar a GxE e avaliar sua intensidade, torna-se possível prever o desempenho dos animais em diferentes ambientes (DALTRO et al., 2022). De acordo com Bignardi et al., (2015), que também observaram dispersão relativa da sensibilidade dos EBVs dos touros ao longo do GA em bovinos da raça Holandesa, os resultados indicam que o potencial genético dos touros necessários para a produção de leite nos melhores ambientes difere daqueles encontrados em ambientes intermediários e desfavoráveis.

As estimativas das correlações genéticas para PL305 e IPP foram de baixa magnitude entre ambientes favoráveis versus ambientes desfavoráveis, indicando a presença de GxE. Para essa situação, muitos dos mesmos genes que influenciam PL305 e IPP em ambientes favoráveis não influenciam em ambientes desfavoráveis (SANTANA et al., 2015). Trabalhos como os de Bignardi et al., (2015); Daltro et al., (2022) também relataram estimativas de correlações genéticas baixas entre ambientes favoráveis e desfavoráveis para produção de leite em bovinos da raça Holandesa e Girolando, respectivamente. Os autores afirmaram a partir dessas estimativas que a condição necessária para a produção de leite em ambientes desfavoráveis não é a mesma necessária para produção de leite em ambientes intermediários ou favoráveis, e vice-versa.

Ao observarmos as correlações Spearman entre os valores genéticos estimados dos touros (EBVs), foi constatado reclassificação dos touros, entre os ambientes desfavoráveis e favoráveis para ambas as características (Figura 08 B-D). Isso significa que os animais com melhores desempenhos de produção para um determinado ambiente, podem não responder da mesma forma em outro. Por exemplo, filhas de um touro para alta produção de leite em um ambiente de alta tecnologia e manejo intensivo, podem não ser eficientes em um ambiente de pastagem. De acordo com Negri et al., (2021) selecionar reprodutores com base apenas no EBV, sem levar em consideração fatores intrínsecos a cada região, pode comprometer o ganho genético dos rebanhos. Os autores também afirmam que investimentos em touros com altos méritos genéticos avaliados em ambientes altamente tecnológicos, não devem ser recomendados para produtores em ambientes menos favoráveis a produção. Hammami et al., (2009) avaliando a sensibilidade de bovinos da raça Holandesa na Tunísia também constataram a reclassificação entre os touros para os ambientes desfavoráveis e favoráveis quando observaram as correlações de Spearman.

7. CONCLUSÃO

Existe interação genótipo para produção de leite em até 305 dias e idade ao primeiro parto em bovinos da raça Girolando no Brasil. A sensibilidade à variação ambiental contempla uma não linearidade, de modo que animais mais sensíveis a mudanças ambientais favoráveis podem não responder da mesma maneira em ambientes desfavoráveis e vice-versa. A heterogeneidade da variância residual deve ser levada em consideração dentro dos estudos de GxE, uma vez que melhora sua avaliação. O modelo heterocedásticos spline linear-linear é recomendado para avaliação genética da produção de leite em até 305 dias e Idade ao primeiro parto em bovinos da raça Girolando. Além disso essas características apresentaram variabilidade genética, o que permite a seleção e ganho genético para essa raça.

8. REFERÊNCIAS

- AMBROSINI, D. P. et al. Reaction norms models in the adjusted weight at 550 days of age for Polled Nellore cattle in Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 43, n. 7, p. 351–357, 2014.
- AMBROSINI, D. P. et al. Genotype $\times$ environment interactions in reproductive traits of Nellore cattle in northeastern Brazil. **Tropical Animal Health and Production**, v. 48, n. 7, p. 1401–1407, 2016.
- ARAÚJO, C. V. et al. Interação genótipo $\times$ ambiente para produção de leite na raça pardo suíço, utilizando-se inferência Bayesiana. **Acta Scientiarum - Animal Sciences**, v. 31, n. 2, p. 205–211, 2009.
- ARAÚJO, C. V. DE; CRISTINA, T.; CALMON, S. Estudo de heterogeneidade de variâncias na avaliação genética de bovinos de corte da raça Nelore. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 1902–1908, 2011.
- ARAUJO NETO, F. R. et al. Study of the effect of genotype–environment interaction on age at first calving and production traits in Nellore cattle using multi-trait reaction norms and Bayesian inference. **Animal Science Journal**, v. 89, n. 7, p. 939–945, 2018.
- ASSIS, A. G. et al. Sistemas de produção de leite no Brasil. **Embrapa**, 2005.
- BIGNARDI, A. B. et al. Reaction norm model to describe environmental sensitivity across first lactation in dairy cattle under tropical conditions. **Tropical Animal Health and Production**, v. 47, n. 7, p. 1405–1410, 2015.
- BOWMAN, J.C. Genotype $\times$ environment interactions. **Annales de Génétique et de Sélection Animale**, v. 4, n. 1, p. 117–123, 1972.
- BRADSHAW, Anthony D. Evolutionary significance of phenotypic plasticity in plants. **Advances in genetics**, v. 13, p. 115–155, 1965.
- BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel Inference Understanding AIC and BIC in Model Selection. **Sociological methods & research**, v. 33, n. 2, p. 261–304, 2004.
- CALUS, M. P. L.; BIJMA, P.; VEERKAMP, R. F. Effects of data structure on the estimation of covariance functions to describe genotype by environment interactions in a reaction norm model. **Genetics Selection Evolution**, v. 36, n. 5, p. 489–507, 2004.
- CALUS, M. P. L.; VEERKAMP, R. F. Estimation of environmental sensitivity of genetic merit for milk production traits using a random regression model. **Journal of Dairy Science**, v. 86, n. 11, p. 3756–3764, 2003.
- CANAZA-CAYO, Ali William et al. Estrutura populacional da raça Girolando. **Ciência Rural**, v. 44, p. 2072–2077, 2014.
- CARDOSO, F. F.; TEMPELMAN, R. J. Linear reaction norm models for genetic merit prediction of Angus cattle under genotype by environment interaction. **Journal of Animal Science**, v. 90, n. 7, p. 2130–2141, 2012.
- CARDOSO, L. L. et al. Hierarchical Bayesian models for genotype $\times$ environment estimates in post-weaning gain of Hereford bovine via reaction norms. n. 2, p. 294–300, 2011.

CARVALHEIRO, Roberto et al. Effects of heterogeneity of residual variance among contemporary groups on genetic evaluation of beef cattle. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, p. 1680-1688, 2002.

CARVALHEIRO, R. et al. Unraveling genetic sensitivity of beef cattle to environmental variation under tropical conditions. **Genetics Selection Evolution**, v. 51, n. 1, 2019.

CARVALHO FILHO, I. et al. Heteroscedastic Reaction Norm Models Improve the Assessment of Genotype by Environment Interaction for Growth, Reproductive, and Visual Score Traits in Nellore Cattle. **Animals**, v. 12, n. 19, 2022.

CECCARELLI, Salvatore. Specific adaptation and breeding for marginal conditions. **Euphytica**, v. 77, p. 205-219, 1994.

CHIAIA, H. L. J. et al. Genotype× environment interaction for age at first calving, scrotal circumference, and yearling weight in Nellore cattle using reaction norms in multitrait random regression models. **Journal of Animal Science**, v. 93, n. 4, p. 1503-1510, 2015.

COBUCI, J. A.; ABREU, U. G. P.; TORRES, R. A. Formação de Grupos Contemporâneos em Bovinos de Corte. 2006.

DALTRO, D. DOS S. et al. Reaction norm model to describe environmental sensitivity in Girolando cattle. **Livestock Science**, v. 263, 2022.

EMBRAPA. **Anuário Leite 2023**: leite baixo carbono. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1154264/anuario-leite-2023-leite-baixo-carbono>. Acesso em: 05/04/2023.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **USDA.gov - United States Department of Agriculture**. Disponível em: <<http://www.usda.gov>>. Acesso em: 25 maio. 2023.

FACÓ, Olivardo et al. Idade ao primeiro parto e intervalo de partos de cinco grupos genéticos Holandês x Gir no Brasil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, p. 1920-1926, 2005.

FACÓ, Olivardo et al. Efeitos genéticos aditivos e não-aditivos para características produtivas e reprodutivas em vacas mestiças Holandês× Gir. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, p. 48-53, 2008.

FAÇANHA, Débora Andréa Evangelista et al. Tendências metodológicas para avaliação da adaptabilidade ao ambiente tropical. **Revista brasileira de saúde e produção animal**, v. 14, p. 91-103, 2013.

FAO. 2022. The State of Food and Agriculture 2022. Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. Rome, FAO.

Falconer DS, Mackay TFC (1996). Introduction to Quantitative Genetics. 4th Edition Longman House: Essex, England.

FARO, L; ALBUQUERQUE, L, G. Utilização de modelos de regressão aleatória para produção de leite no dia do controle, com diferentes estruturas de variâncias residuais. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, p. 1104-1113, 2003.

FOULLEY, J. L.; QUAAS, R. L. Heterogeneous variances in Gaussian linear mixed models. **Genetics Selection Evolution**, v. 27, n. 3, p. 211, 1995.

HALDANE, John Burdon Sanderson. The interaction of nature and nurture. **Annals of eugenics**, v. 13, n. 1, p. 197-205, 1946.

HAMMAMI, H. et al. Environmental sensitivity for milk yield in Luxembourg and tunisian Holsteins by herd management level. **Journal of Dairy Science**, v. 92, n. 9, p. 4604–4612, 2009.

HENDERSON, Charles R. Applications of linear models in animal breeding models. **Guelph, Ontario, Canada: University of Guelph**, 1984.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Brasília, DF: IBGE, 2022.

JONG, G. Phenotypic plasticity as a product of selection in a variable environment. **The American Naturalist**, v.145, p.493-512, 1995.

JONG, G.; BIJMA, P. Selection and phenotypic plasticity in evolutionary biology and animal breeding. **Livestock production science**, v. 78, n. 3, p. 195-214, 2002.

KINGSOLVER, Joel G.; RAGLAND, Gregory J.; SHLICHTA, J. Gwen. Quantitative genetics of continuous reaction norms: thermal sensitivity of caterpillar growth rates. **Evolution**, v. 58, n. 7, p. 1521-1529, 2004.

KIRKPATRICK, Mark; LOFSVOLD, David; BULMER, Michael. Analysis of the inheritance, selection and evolution of growth trajectories. **Genetics**, v. 124, n. 4, p. 979-993, 1990.

KOLMODIN, R. et al. Genotype by environment interaction in Nordic dairy cattle studied using reaction norms. **Acta Agriculturae Scandinavica - Section A: Animal Science**, v. 52, n. 1, p. 11–24, 2002.

KOMOLDIN, R. Reaction norms for the study of genotype by environment interaction in animal breeding. 2003. 35 f. Tese (Doutorado em Animal Breeding and Genetics) - **Swedish University of Agricultural Sciences**. Uppsala, 2003.

LEMOES, M. V. A. et al. Reaction norms for the study of genotype-environment interaction for growth and indicator traits of sexual precocity in nellore cattle. **Genetics and Molecular Research**, v. 14, n. 2, p. 7151–7162, 2015.

LIMA, J. G. A. et al. Comparação de métodos de estimativa de eto e análise de sensibilidade para diferentes climas brasileiros. **Irriga**, v. 24, n. 3, p. 538–551, 2019.

LOPES, J. S. et al. Genotype and environment interaction effect on weights at birth, 205 and 550 days of age of Nellore cattle in the South Region of Brazil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 1, p. 54–60, 2008.

LUSH, Jay L. **Animal breeding plans**. Read Books Ltd, Ed. 2, 1945.

LYNCH, Michael et al. Genetics and analysis of quantitative traits. **Sunderland, MA: Sinauer**, v. 1, p. 535-557, 1998.

MEYER, Karin. Estimating covariance functions for longitudinal data using a random regression model. **Genetics Selection Evolution**, v. 30, n. 3, p. 221-240, 1998.

MEYER, Karin. Random regression analyses using B-splines to model growth of Australian Angus cattle. **Genetics Selection Evolution**, v. 37, p. 1-28, 2005.

MISZTAL, I. et al. BLUPF90 and related programs (BGF90). In: **Proceedings of the 7th world congress on genetics applied to livestock production**. 2002. p. 743.

MOTA, L. F. M. **ESTIMATION OF GENOTYPE-ENVIRONMENT INTERACTION USING GENOMIC REACTION NORM AND ANALYSIS OF GENE NETWORK FOR REPRODUCTIVE TRAITS IN NELLORE CATTLE**. 2019.

MOTA, R. R. et al. Genotype by environment interaction for tick resistance of Hereford and Braford beef cattle using reaction norm models. **Genetics Selection Evolution**, v. 48, n. 1, 2016.

NEGRI, R. et al. Selection for test-day milk yield and thermotolerance in brazilian holstein cattle. **Animals**, v. 11, n. 1, p. 1–13, 2021.

OLIVEIRA, H. N. Grupos de contemporâneos e conectabilidade. **CURSO SOBRE AVALIAÇÃO GENÉTICA DE BOVINOS DE CORTE EM GOIÁS**, p. 39-50, 1996.

PÉGOLO, Newton T. et al. Genotype by environment interaction for 450-day weight of Nelore cattle analyzed by reaction norm models. **Genetics and Molecular Biology**, v. 32, p. 281-287, 2009.

RAVAGNOLO, O.; M, I.; H, G. Genetic component of heat stress in dairy cattle, development of heat index function. **Journal of dairy science**, v. 83, n. 9, p. 2120-2125, 2000.

REVERTER, A. et al. Assessing the efficiency of multiplicative mixed model equations to account for heterogeneous variance across herds in carcass scan traits from beef cattle. **Journal of Animal Science**, v. 75, n. 6, p. 1477-1485, 1997.

RIBEIRO, S. et al. Influência da interação genótipo x ambiente sobre o peso à desmama em bovinos da raça Nelore. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 61, n. 3, p. 668–675, 2009.

ROBERTSON, Alan. The sampling variance of the genetic correlation coefficient. **Biometrics**, v. 15, n. 3, p. 469-485, 1959.

SANTANA, M. L. et al. Phenotypic plasticity of composite beef cattle performance using reaction norms model with unknown covariate. **Animal**, v. 7, n. 2, p. 202–210, 2012.

SANTANA, M. L. et al. Phenotypic plasticity of composite beef cattle performance using reaction norms model with unknown covariate. **Animal**, v. 7, n. 2, p. 202–210, 2013.

SANTANA, M. L. et al. Multi-trait linear reaction norm model to describe the pattern of phenotypic expression of some economic traits in beef cattle across a range of environments. **Journal of Applied Genetics**, v. 56, n. 2, p. 219–229, 2015.

SANTANA, M. L. et al. Random regression models to account for the effect of genotype by environment interaction due to heat stress on the milk yield of Holstein cows under tropical conditions. **Journal of Applied Genetics**, v. 57, n. 1, p. 119–127, 2016.

SANTOS, F. L. C. **MODELO DE NORMA DE REAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO GENÓTIPO X AMBIENTE PARA IDADE AO PRIMEIRO PARTO EM BOVINOS DA RAÇA GUZERÁ**. 2020. Disponível em: <<https://locus.ufv.br/handle/123456789/30247>>. Acesso em: 20 maio. 2023.

SCHAEFFER, L.R.; DEKKERS, J.C.M. Random regressions in animal models for test-day production in dairy cattle. In: **World Congress of Genetics Applied Livestock Production**, 1994. 1994. p. 443-446.

SCHWARZ, G. Institute of Mathematical Statistics is collaborating with JSTOR to digitize, preserve, and extend access to The Annals of Statistics. @ www.jstor.org. **Annals of Statistics**, v. 6, n. 2, p. 461–464, 1978.

SHIMBO, M. V et al. EFEITO DO AMBIENTE EM CARACTERÍSTICAS PRODUTIVAS NA RAÇA NELORE. *Pirassununga : FZEA-USP, Anais*, 2000.

SILVA, M. V. G. B. et al. **Programa de melhoramento genético da raça Girolando: teste de progênie: Sumário de Touros 2010**. 2010.

SILVA, M.V.G.B. et al. **Programa de Melhoramento Genético da Raça Girolando-avaliação genética/genômica de fêmeas-junho 2022**. 2022.

SILVA, J. C. P. M; VELOSO, C. M. **Raças de gado leiteiro**. 1ª edição. Editora aprenda fácil. 149p, 2011.

SIMONELLI, S. M. et al. Critérios de seleção para características de crescimento em bovinos da raça Nelore. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 56, p. 374-384, 2004.

STREIT, M. et al. Reaction norms and genotype-by-environment interaction in the German Holstein dairy cattle. **Journal of Animal Breeding and Genetics**, v. 129, n. 5, p. 380–389, 2012.

TITTO, E.A.L. Clima: Influência na Produção de Leite. Piracicaba, SP, 1998. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AMBIÊNCIA NA PRODUÇÃO DE LEITE, 1, 1998, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, p.10-23, 1998.

VAN VLECK, L. D. Contemporary Groups for Genetic Evaluations. **Journal of Dairy Science**, v. 70, n. 11, p. 2456–2464, 1987.

WOLTERECK, Richard. Weitere experimentelle Untersuchungen über Artveränderung, speziell über das Wesen quantitativer Artunterschiede bei Daphniden. **Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft**, v. 1909, p. 110-172, 1909.

9. MATERIAL SUPLEMENTAR

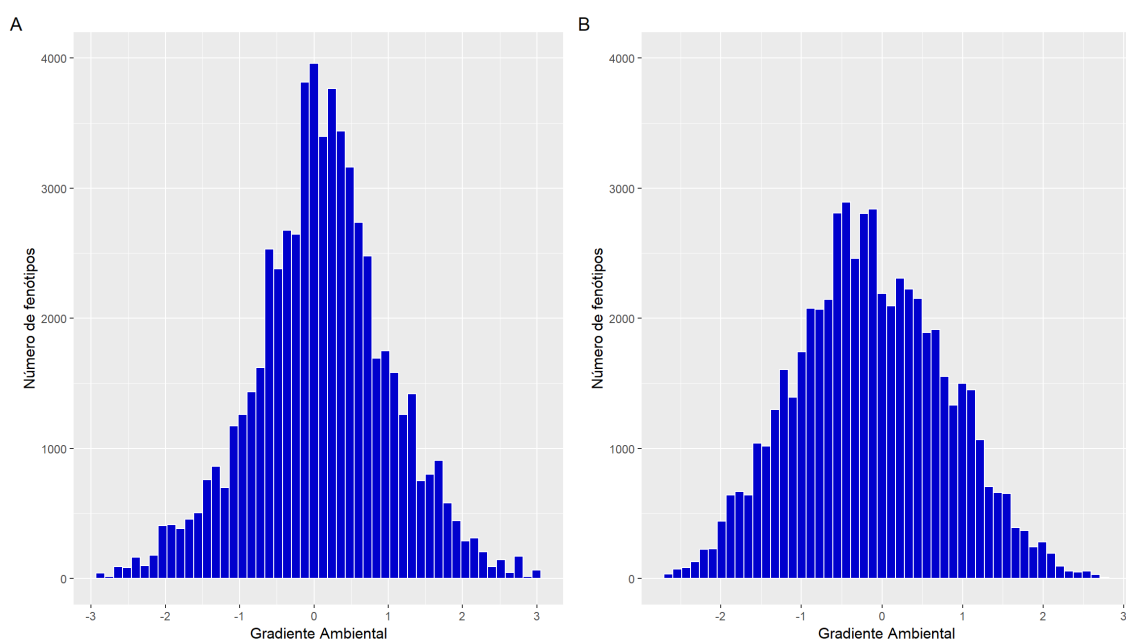


Figura S1 – Número de fenótipos por gradiente ambiental para produção de leite em até 305 dias (A) e idade ao primeiro parto (B).

Tabela S1 - Estatística descritiva das características produção de leite em até 305 dias (PL305) e idade ao primeiro parto (IPP) por composição racial (CR) e geral em bovinos da raça Girolando.

Caract.	CR	N	min.	média	max.	DP	GC
PL305 (kg)	G	232	144,3	3.256,2	7.874,2	1.625,49	-
	H	662	80	5.223,31	15.398	2.104,18	-
	7/8H:1/8G	4.512	53,8	5.320,9	16.206,1	2.349,21	-
	5/8H:3/8G	7.989	44,13	4.874,8	14.495,8	2.291,75	-
	3/8H:5/8G	1.545	51,07	4.042,48	11.362,4	2.093,36	-
	3/4H:1/4G	20.332	36,16	5.366,84	16.673,5	2.422,85	-
	1/4H:3/4G	1.556	33,93	4.011,18	12.546,8	2.280,97	-
	1/2H:1/2G	25.650	27,5	5.469,8	14.884,4	2.489,43	-
IPP (dias)	H	566	583	959,5	1.318	168,169	-
	G	223	804	1.093	1.320	130,701	-
	7/8H:1/8G	4.263	532	980,9	1.320	164,211	-
	5/8H:3/8G	7.422	545	993,7	1.320	166,62	-
	3/8H:5/8G	1.414	590	1.066	1.320	145,64	-
	3/4H:1/4G	19.390	542	974,6	1.320	159,748	-
	1/4H:3/4G	1.477	678	1.059	1.320	149,205	-
	1/2H:1/2G	24.843	555	959,5	1.320	156,208	-
PL305	-	62.478	27,5	5.267,4	16.673,5	2.439,89	4.395
IPP	-	59.598	532	975,7	1320	160,703	4.243

N: número de registros fenotípicos; DP: desvio padrão; GC: grupo de contemporâneos; H = Holandês e G = Gir.

Tabela S2 - Médias das características produção de leite em até 305 dias (PL305) e idade ao primeiro parto (IPP) por gradiente ambiental em bovinos da raça Girolando.

Gradiente Ambiental	Característica	
	PL305(kg)	IPP(dias)
3	10.090,98	1.283,60
2	8.485,25	1.181,70
1	6.891,61	1.073,76
0	5.291,72	964,03
-1	3.688,37	854,54
-2	2.090,06	747,12
-3	675,34	649,54