pubvet
MEDICINA VETERINÁRIA E ZOOTECNIA
ISSN 1982-1263
https://doi.org/10.31533/pubvet.v16n10a1226.1-15

Resiliência como indicador dinâmico do bem-estar de bovinos leiteiros

Luís Alberto Ambrósio[1], Luciandra Macedo de Toledo[2], Mateus José Rodrigues Paranhos da Costa[3], Franciely de Oliveira Costa[4]

[1]*Instituto de Zootecnia da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, Nova Odessa, SP, Brasil*
[2]*Instituto de Zootecnia da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, Ribeirão Preto, SP, Brasil*
[3]*Departamento de Zootecnia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias -UNESP, Jaboticabal, SP, Brasil.*
[4]*Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Ceará (EMATERCE), Maranguape, CE, Brasil*
**Autor para correspondência, E-mail: ambrosioiz@yahoo.com.br*

Resumo. O caráter dinâmico do bem-estar animal na pecuária leiteira é um atributo útil para o planejamento, manejo e avaliação de sistemas de produção de bovinos leiteiros, mas este é um aspecto ainda pouco desenvolvido e raramente considerado, em parte, devido à falta de indicadores dinâmicos. Este trabalho propõe a resiliência como indicador dinâmico de bem-estar animal para ser utilizado nos protocolos de avaliação da pecuária leiteira. Esta resiliência foi definida como a capacidade do animal ou rebanho em lidar com distúrbios ao longo do tempo e recompor a trajetória do bem-estar após sofrer um distúrbio. A metodologia de dinâmica de sistemas viabilizou a operacionalização do conceito de resiliência por meio da construção de modelos conceitual e computacional e simulação dos índices: dureza, robustez, elasticidade, rapidez de recuperação e índice de resiliência. Os valores dos índices de resiliência simulados, como exemplo, indicaram a sua adequação como indicador dinâmico do bem-estar animal por serem aderentes aos conceitos etológicos intrínsecos e fornecerem um conjunto de informações úteis para comparar a dinâmica do estado do bem-estar animal em diferentes situações e cenários da bovinocultura leiteira.

Palavras chave: Bem-estar animal, dinâmica de sistemas, modelagem

Resilience as a dynamical indicator of the dairy cattle welfare

Abstract. The dynamic character of animal welfare in dairy farming is a useful attribute for the planning, management and evaluation of animal production systems. However, this is an aspect that is still underdeveloped and rarely considered in part due to the lack of dynamic indicators. This work proposes resilience as a dynamic indicator of animal welfare for use in dairy cattle protocols. Resilience is the animal's ability to cope with disturbances over time and recover its initial state of welfare after suffering from a disturbance. We present a method to operationalize the resilience of animal welfare through system dynamics modeling to calculate the indices: hardness, robustness, elasticity, recover rapidity, and resilience index. The resilience indices simulated with the computational model, as an example, showed the adequacy of the resilience as a dynamical indicator of animal welfare. The values of resilience indices obtained were adherents to the intrinsic concepts of animal welfare and give a set of useful information to compare the dynamic state of animal welfare in different situations and scenarios.

Keywords: Animal welfare, system dynamics, modelling

Introdução

As mudanças econômicas, sociais e políticas que ocorreram na cadeia leiteira nas últimas décadas influenciaram a melhora na produtividade e na qualidade dos laticínios. No período de 1974 a 2018, a

bovinocultura leiteira brasileira obteve a impressionante taxa de crescimento da produção nacional de leite de 376%, passando de 7,1 bilhões para 33,8 bilhões de litros e aumentou em 51% a quantidade de vacas ordenhadas, simultaneamente a produtividade (L/vaca/ano) cresceu 216% (Almeida & Bacha, 2021; ANUALPEC, 2022). O ambiente produtivo atual ainda apresenta alta heterogeneidade entre produtores, tecnologias e técnicas de manejo, associada a diversidade regional nas eficiências técnicas, econômicas e ambientais das unidades de produção ao longo dos anos (Almeida & Bacha, 2021; ANUALPEC, 2022). As tecnologias projetadas para o aumento da produção visando a obtenção da eficiência econômica provêm novos ambientes para os quais os animais não estão adaptados (Paranhos da Costa, 2004), causando efeitos colaterais em termos de traumas ou distúrbios físicos e psicológicos que comprometem o bem-estar dos animais. De fato, por exemplo, a incidência, a gravidade e a duração de podopatias, agravadas em condições tecnológicas de confinamento dos animais, são fatores que diminuem o bem-estar de bovinos leiteiros (Amaral & Trevisan, 2017).

O conflito entre eficiência técnica-econômica e bem-estar (Allendorf & Wettemann, 2015; Dawkins, 2017), por força de pressões éticas e sociais e interesses da cadeia produtiva, vem sendo resolvido ou ao menos reduzido por meio da adoção de boas práticas de manejo, com sinergia com o ganho de produtividade, ganho econômico e promoção do bem-estar animal (Paranhos da Costa & Ceballos, 2021). Outras práticas como o melhoramento genético (Azevedo et al., 2020; Grandin, 2014) e a pecuária de precisão também vêm sendo estudadas para aumentar o bem-estar dos bovinos e a eficiência econômica (Norton et al., 2019). Em função do sofrimento dos animais, da demanda social e da legislação, a questão do bem-estar animal vem se tornando cada vez mais um requisito de ordem ética, biológica e econômica, necessário para a gestão da produção animal, em particular para a pecuária leiteira, em busca da qualidade dos alimentos e da segurança alimentar (Andrioli et al., 2020). Assim, a ineficiência pode ser parte de um processo de ajuste de auto reposicionamento estratégico, que vai além da interpretação geral de baixo desempenho. Neste quadro, torna-se importante avaliar a dinâmica simultânea da eficiência e do bem-estar animal para auxiliar na decisão racional de investimentos ao longo do tempo na bovinocultura leiteira (Adamie & Hansson, 2022).

O bem-estar animal se refere ao estado de um animal em suas tentativas de se ajustar ao seu ambiente (Broom, 1986) e sua avaliação deve ser feita com base em medidas objetivas, respaldadas por evidências científicas. Assim, como um dos ramos da ciência, o bem-estar animal analisa os estados mensuráveis da interação humano-animal. O conceito e a forma de medir o bem-estar animal são determinantes para a sua incorporação como um atributo útil e prático para o planejamento, manejo e avaliação de sistemas da bovinocultura leiteira. Dada a complexidade dos sistemas de criação compostos por componentes humano, animal, ambiental e suas interações, diversos indicadores são usados na avaliação do bem-estar dos animais. Nenhum indicador, usado isoladamente, consegue caracterizar o bem-estar animal, sendo recomendado o uso de múltiplos indicadores (Broom, 1991; Krueger et al., 2020; Lerner, 2008).

Em geral, os indicadores de bem-estar animal são pontuais e estáticos, baseados em informações coletadas em um determinado momento, caracterizando o estado atual de bem-estar do animal, por exemplo, numa escala entre bom e ruim. Com isto, perdem-se as informações sobre as mudanças de estado de bem-estar que ocorrem ao longo do tempo. Webster (2016) identificou limitação no uso das "cinco liberdades" para avaliar o bem-estar animal por descreverem o bem-estar de um dado animal em um momento específico no tempo. Assim, o conceito das cinco liberdades não reflete adequadamente as causas e consequências dos fatores que levam aos problemas de longo prazo. O autor, então, recomendou que o protocolo de trabalho para a avaliação do bem-estar dos animais inclua índices crônicos de falhas em lidar com os desafios físico e emocional.

O bem-estar animal é um estado dinâmico (Clark et al., 1997; Mellor & Reid, 1994; Ohl & Putman, 2014) complexo que varia em um contínuo (Fernandes et al., 2021; Hemsworth et al., 2015) de manifestações determinadas por uma multiplicidade de estímulos externos (psicossocial e físico) e internos (mental e biológicos), variáveis interativas e por outros aspectos, como ética, genética, variação individual, meio social, experiência, aprendizagem, percepção, estilo de enfrentamento (intensidade e duração) e frequência de estímulos (Clark et al., 1997). O tempo deve ser considerado como uma variável nas decisões sobre o bem-estar animal, pois, conforme Broom & Johnson (1993), a existência da dimensão temporal fica clara na análise de problemas crônicos de longa duração que estão associados com um estado de bem-estar pobre (ruim). Por exemplo, Bond et al. (2012) citando Broom & Johnson

(1993) e considerando a importância do binômio intensidade e duração para o diagnóstico de bem-estar animal, concluíram que um animal que apresenta mastite severa por longo período tem seu grau de bem-estar reduzido de maneira importante. Assim, é correto assumir que o estado do bem-estar dos animais de um determinado rebanho é dinâmico. Mas, este aspecto ainda é pouco desenvolvido e raramente considerado nas avaliações das condições de criação e manejo de bovinos leiteiros. Isto, em parte, se deve à falta de indicadores dinâmicos, aos altos custos de obtenção de séries temporais de dados de monitoramento da produção animal, a baixa percepção da utilidade de indicadores dinâmicos e a não aplicação de enfoque sistêmico na avaliação do bem-estar animal (Wemelsfelder & Mullan, 2014). Este quadro tende a mudar em resposta à pressão de normas comerciais de qualidade que exigem consistência ao longo do tempo dos protocolos de avaliações do bem-estar, abordando a preocupação decorrente da variabilidade potencial dos indicadores de bem-estar animal em diferentes períodos e condições ambientais (Can et al., 2017). Com base em Kirchner et al. (2014) infere-se que na busca pela confiabilidade do protocolo ao longo do tempo, está implícita a existência de um estado padrão de bem-estar animal (desejado) no longo prazo, desde que as condições de criação não apresentem mudanças significativas. A confiabilidade se refere à extensão em que as unidades de produção podem ser distinguidas umas das outras, independentemente do erro de medição (Can et al., 2017).

Na gestão do bem-estar animal surge o desafio de medir a capacidade de manter ou recompor o padrão desejado de bem-estar quando ocorrem situações adversas ou negativas. Esta capacidade é aqui conceituada como resiliência do bem-estar animal. A resiliência engloba o conceito de que é possível a recuperação do estado de bem-estar animal algum tempo após sofrer um distúrbio e que tanto o animal como o sistema de produção de leite irão permanecer "normais" depois daquele tempo, se não ocorrerem novos distúrbios. Neste trabalho, define-se a resiliência de bem-estar animal como sendo o potencial dinâmico de um arranjo particular de um sistema de produção de leite para manter e/ou recompor o estado desejado de bem-estar dos animais e suas funções (reprodução, produção de leite, geração de renda, emprego e contribuir para a qualidade dos alimentos e segurança alimentar) quando e enquanto for afetado por um distúrbio de causa natural ou antrópica. A resiliência é considerada um constituinte do bem-estar animal em determinado sistema de criação. Assim, propõe-se a resiliência como indicador dinâmico do bem-estar animal.

O objetivo geral neste trabalho é conceituar a dinâmica do bem-estar animal e propor um método para operacionalizar a resiliência como seu atributo e indicador dinâmico na pecuária leiteira, bem como exemplificar os cálculos e interpretações dos índices de resiliência com uso de modelos conceitual e computacional simplificados de bem-estar animal, construídos com base na metodologia de dinâmica de sistema.

Material e métodos

Dinâmica de sistemas

O processo de modelagem da dinâmica de sistemas lida com a integração de três tipos de modelos: mental, conceitual e computacional (Sterman, 2000). O principal resultado prático esperado da aplicação da dinâmica de sistemas na modelagem de problemas complexos do bem-estar animal é o de promover a melhora no modelo mental das pessoas e na estrutura cognitiva, contribuindo para o entendimento do sistema e para a qualidade nas decisões dinâmicas (Doyle & Ford, 1998; Forrester, 2013).

O modelo conceitual é uma representação gráfica do modelo mental que permite capturar hipóteses sobre as causas da dinâmica, elicitar e capturar os fatores relevantes baseados em conhecimentos dos indivíduos ou das equipes e comunicar as retroalimentações entre os componentes importantes do sistema que se acredita serem responsáveis por um problema. Na construção do modelo conceitual usa-se o diagrama de ciclo causal (*Causal Loop Diagram* - CLD), o qual é uma ferramenta gráfica qualitativa que contém as informações básicas de polaridade das influências causais entre os componentes dos sistemas, das retroalimentações e das demoras (*delays*) (Senge, 2012; Sterman, 2000).

A polaridade da influência de uma variável sobre outra é entendida como uma relação de causalidade, condição necessária para converter o conhecimento sobre a estrutura em conhecimento sobre o comportamento do sistema (Richardson, 1995). No CLD as relações de causa e efeito entre as variáveis são representadas por setas com sinal positivo [polaridade positiva, (+)] ou sinal negativo [polaridade negativa, (-)]. Na polaridade (+), os efeitos ocorrem no mesmo sentido. Ou seja, se ocorrer aumento (ou

diminuição) de uma variável, então haverá aumento (ou diminuição) na variável influenciada. Na polaridade (-), os efeitos ocorrem em sentidos opostos. A retroalimentação envolve uma cadeia fechada de relações causais entre as variáveis formando ciclos causais de reforço (R) ou de balanço (B). De modo simplificado, identifica-se a polaridade dos ciclos causais pela quantidade de influências com polaridade negativa. Assim, o ciclo de reforço possui quantidade par ou zero de influências com polaridade negativa e o ciclo de balanço possui quantidade ímpar de influências com polaridade negativa. Richardson (1995) apresenta uma definição rigorosa da polaridade. Na modelagem de um problema de sistema complexo, vários ciclos de retroalimentação de balanço e reforço são interligados. Consequentemente, o comportamento do sistema, por hipótese dinâmica, será resultante da integração dos padrões de comportamento de cada ciclo, fazendo emergir um comportamento contra intuitivo denominado de comportamento ao longo do tempo (*Behavior Over Time* – BOT, também chamado de padrões de referência) visualizado em gráfico. Um ciclo de reforço produz um BOT de crescimento ou decréscimo exponencial na variável estado ao longo do tempo e em um ciclo de balanço as ações levam o sistema para um estado de equilíbrio, fazendo com que a curva de tendência da variável estado em função do tempo cresça ou diminua até alcançar um patamar. A demora (símbolo //) é o tempo necessário para que a variável causadora chegue a influenciar a variável afetada, produzindo um BOT oscilante ao longo do tempo (Senge, 2012; Sterman, 2000).

Neste trabalho, a construção de modelos computacionais visou a obtenção dos BOT das variáveis estado do sistema por meio de simulações em diversos cenários. O modelo computacional foi construído usando o diagrama de compartimento e fluxo, proposto por Forrester (2013), o qual possui símbolos gráficos (Figura 1) para estoque, fluxo, variável, influência e demora.

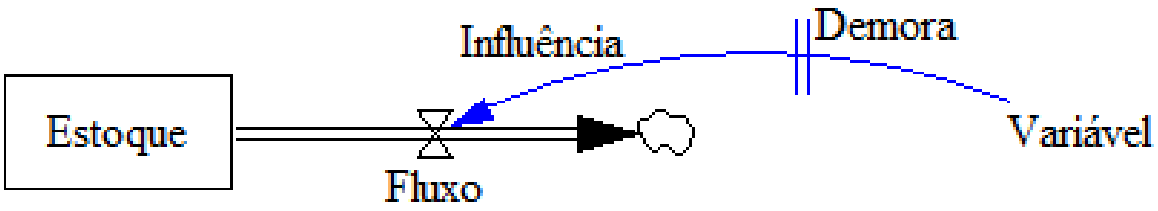

Figura 1. Elementos do diagrama de Forrester (2013) desenhados com o software Vensim PLE. O fluxo representa as ações que geram as variações produzidas no sistema. A taxa do fluxo de entrada indica quanto o estoque da variável estado aumenta a cada passo de tempo e a taxa do fluxo de saída do compartimento indica quando o estoque diminui a cada passo de tempo. Os compartimentos (retângulos) são estoques que indicam o estado do sistema a cada momento, representam uma variável estado. Na ligação de compartimento e fluxos se processam os cálculos da dinâmica do sistema, ou seja, a partir de um estoque inicial, a cada passo de tempo o estoque é modificado somando as quantidades dos fluxos de entrada e subtraindo as quantidades dos fluxos de saída. As variáveis representam as relações, calculadas por equações algébricas, entre os componentes do sistema. Em geral, são variáveis auxiliares que determinam as taxas dos fluxos, mas também podem ser variáveis totalizadoras que estabelecem relações entre dois compartimentos, por exemplo. Os conectores de influências representam as ligações e transmissão de informações entre os componentes do sistema. As barras paralelas na seta representam demora (*delay*) na influência.

No modelo computacional, as relações entre estoque e fluxos formam um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, não lineares. A simulação do modelo fornece soluções analíticas por meio da integração destas equações diferenciais, em geral, pelo método de integração de Euler. Outros cálculos algébricos de relações entre variáveis também são executados durante a simulação (Sterman, 2000). Considerando os sistemas complexos e não lineares tais como os que condicionam o bem-estar animal e que a resiliência é dinâmica, a metodologia de Dinâmica de Sistemas foi usada para simular as respostas do sistema aos distúrbios e para analisar as estruturas causais que conduzem essas respostas. As simulações do modelo computacional geraram os valores dos parâmetros, ao longo do tempo, para diversas magnitudes do distúrbio que foram usadas nos cálculos de indicadores para a operacionalização da resiliência.

Indicadores de resiliência do bem-estar animal

Para que a resiliência seja adequada como indicador de bem-estar animal é necessário que haja conformidade com as seguintes qualidades, conforme Sorensen et al. (2002): ter base no conhecimento

científico; refletir o desenvolvimento ao longo do tempo; ter medição realista para a unidade de produção em questão; e servir como suporte à decisão do pecuarista.

Os indicadores propostos para operacionalização da resiliência de bem-estar animal foram baseados nas formulações feitas por Herrera (2017) para a quantificação da resiliência com base na medição dos atributos mensuráveis dos sistemas relacionados às suas resiliências, mas que expressam o comportamento dos resultados desejados do sistema (produtos). No caso, considera-se o estado de bem-estar animal como sendo o resultado desejado no sistema (animal ou rebanho) representado por uma função F(X) cujo desempenho é afetado pelo distúrbio, que é um evento adverso repentino ou contínuo que pressiona o sistema. Os indicadores propostos com base em Herrera (2017) foram definidos como:

- Dureza (σ_D): é a capacidade do sistema (animal ou rebanho) para resistir a um distúrbio (σ) sem apresentar uma alteração no grau de bem-estar. Quanto maior o valor da dureza, maior é o distúrbio necessário para produzir qualquer mudança no estado do bem-estar animal, ao longo do tempo.

- Rapidez da recuperação ($\bar{R}$): é a taxa média em que um sistema retorna ao equilíbrio após um distúrbio (σ). Quanto maior a rapidez da recuperação, mais rápido o sistema recupera o grau de bem-estar após o distúrbio.

- Robustez ($\bar{\rho}$): é a capacidade do sistema para suportar grandes distúrbios (σ) sem perda significativa de desempenho ou de mudança do estado de bem-estar animal. Quanto mais robusto o comportamento do bem-estar, F(X), menor é a mudança no estado do bem-estar produzida pelo mesmo distúrbio.

- Elasticidade (σ_E): é a capacidade do sistema para resistir a um distúrbio (σ) sem mudar para um estado estável diferente. Quanto mais elástico for o sistema, maior será o distúrbio que pode ser absorvido sem mudar para um regime alternativo.

- Índice de resiliência (I_R): é a probabilidade de manter o atual estado ou o regime estável do sistema. Quanto maior o I_R, menor é a probabilidade de mudar o estado atual do sistema para outro estado de bem-estar.

Aqui considera-se o bem-estar como o resultado do sistema de produção de bovinos leiteiros representado por uma função F(X) quantificável e dependente do tempo. A F(X) do nível de bem-estar dos animais, por hipótese, segue uma trajetória de crescimento ao longo do tempo (ou com pequenas oscilações) em situações de enriquecimento ou melhora ambiental da criação dos animais e na ausência de distúrbios.

Em termos práticos, na $F(X)_t$, X representa um indicador único ou um indicador múltiplo de bem-estar, em uso na pecuária leiteira, mas que passa a ser monitorado e medido ao longo do tempo. É de se esperar diversos comportamentos de F(X) ao longo tempo, representados graficamente por diferentes tipos de curvas. A Figura 2 apresenta uma situação hipotética em que a linha reta contínua em (**A**) representa o nível desejado de bem-estar de um animal ou rebanho. A intensidade dos efeitos de um distúrbio (**σ**), que no caso se prolonga ao longo do tempo (entre **ti** e **tp**) é ilustrada pelos retângulos, conforme conceito de Broom (1998) para bem-estar. A trajetória da mudança de estado do bem-estar é mostrada pela curva vermelha. Observa-se que a partir do tempo **tp** começa a recuperação do bem-estar até alcançar o estado inicial em (**A**).

Para medir os indicadores de resiliência do bem-estar animal para o comportamento de F(X), simulado em modelo computacional de dinâmica de sistemas, exemplificado na Figura 2, os parâmetros foram estimados usando as seguintes equações, conforme Herrera (2017):

1) A função F(X) é representada pelo grau de bem-estar do animal, ao longo do tempo. O comportamento da $F(X)^0$ é estimado no modelo computacional considerando que não há distúrbio. Na prática, usando séries temporais observadas a campo, este comportamento da $F(X)_t$ pode estar em equilíbrio dinâmico (representado por uma linha horizontal) ou pode exibir outro padrão de curva ao longo do tempo (bem-estar crescente, em processo de melhoria; decrescente, em processo de deterioração; ou oscilando). Os efeitos de condições adversas sobre o bem-estar dos animais foram considerados como um distúrbio (**σ**). O distúrbio (**σ**) é calculado como o produto da magnitude do distúrbio (**δ**) e a duração do distúrbio (**tp - ti**), Equação (1).

2) Nas simulações, os tempos **ti** e **tp** foram escolhidos para coincidirem com as fases críticas, por exemplo, da evolução de uma patologia. Para medir a Dureza (σ_D) mantêm-se nas simulações os valores de **ti** e **tp** constantes e modifica-se a magnitude do distúrbio (**δ**) ajustando manualmente o distúrbio (**σ**). O menor distúrbio (σ_D) é o que produz uma função de resultado diferente ($F(X)D \neq F(X)^0$). Observe na Figura 2 que a $F(X)^D$ se iguala a $F(X)^0$ no tempo **tf** (restauração). Este distúrbio (σ_D) representa a dureza do sistema e é calculado usando a Equação (2).

Distúrbio $\sigma = \delta \times (tp-ti)$ Equação (1)

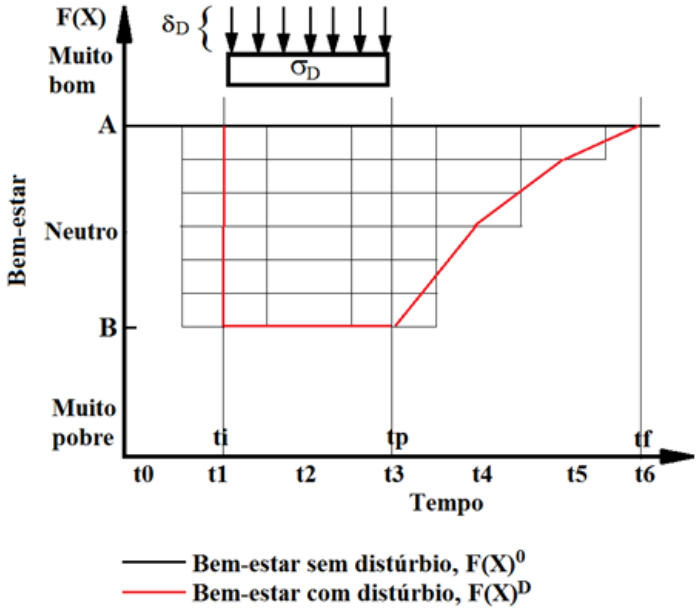

Figura 2. Exemplos de comportamento do bem-estar (F(X) sendo o comportamento do sistema sem distúrbio (linha preta) e o comportamento com resposta hipotética (linha vermelha) do sistema para um distúrbio (**σ**) com magnitude (**δ**) e duração (**tp** – **ti**). Onde, **ti**, tempo de início do efeito do distúrbio sobre o sistema; **tp**, tempo em que o distúrbio para de afetar o sistema; **tf**, tempo no qual o sistema se recupera totalmente para as condições normais do sistema (nível **A**). Fonte: Desenho modificado de Herrera (2017).

Dureza $\sigma_D = \delta_D \times (tp-ti)$ Equação (2)

3) Novas simulações aumentando a magnitude do distúrbio (**δ**) e mantendo **ti** e **tp** constantes geram um comportamento $F(X)^E$ que não restaura a $F(X)^0$, Figura 2. Isto é, com esta alta magnitude de distúrbio não se reproduz a tendência original do comportamento do sistema, não se restabelece o nível desejado de bem-estar. Assim, obtém-se o indicador Elasticidade (σ_E) que é o distúrbio que produz $F(X)^E$ calculado usando a Equação (3):

Elasticidade $\sigma_E = \delta_E \times (tp-ti)$ Equação (3)

4) Para obter a estimativa para os indicadores Robustez e Rapidez de recuperação, em cada rodada da simulação (para diferentes **δ** ajustadas manualmente), são registrados os valores de **δ**, **A**, **B**, **tf** e **tp** que serão usados nas Equações (4 e 5), para calcular as médias aritméticas dos valores obtidos nas rodadas de simulação. Na prática, estas médias podem ser obtidas em diferentes avaliações do bem-estar do mesmo animal ou de diferentes animais no rebanho.

Rapidez de recuperação $\bar{R} = (A-B) / (tf-tp)$ Equação (4)

Robustez $\bar{\rho} = \sigma / (A-B)$ Equação (5)

5) O Índice de resiliência (I_R) é definido como sendo a probabilidade do distúrbio (**σ**) ser menor que σ_E, $P(\sigma \leq \sigma_E)$. O I_R pode ser calculado como a proporção de distúrbio σ menor ou igual o σ_E em relação ao total de distúrbios plausíveis usando a Equação (6).

Índice de Resiliência $I_R = P(\sigma \leq \sigma_E)$ Equação (6)

Deve-se notar que o procedimento de alterar manualmente os valores da magnitude do distúrbio (**δ**) em diversas rodadas de simulação consiste em um experimento in silico, realizado para gerar uma amostra de valores dos parâmetros usados nos cálculos dos indicadores de resiliência. Isto é necessário devido à dificuldade de se obter tais valores com medições reais (a campo) com diferentes comportamentos de F(X) onde a magnitude do distúrbio não é controlada. Neste trabalho, assume-se que o valor do distúrbio tem distribuição uniforme, com mesma probabilidade de ocorrência, variando na escala de 0 a 1. Para tanto, considerando uma duração de quatro unidades de tempo, as magnitudes testadas foram de baixo valor entre 0,10 e 0,20.

Para executar as simulações do modelo obtendo o grau de bem-estar animal ao longo do tempo, F(X)t, foram construídos seis cenários ambientais (Tabela 1) combinando três níveis de magnitude (0; 0,1 e 0,2) do distúrbio com duas situações ambientais (favorável e desfavorável) supondo que cada um destes cenários represente uma situação diferente que um animal ou rebanho experimenta ao longo do período de interesse para avaliação do bem-estar. Os cenários C0F e C0D representam a ausência de distúrbios que o sistema está em ambiente favorável e desfavorável, respectivamente. Todos cenários supõem que o bem-estar do animal ou rebanho inicialmente estão em um nível baixo positivo (Bem-estar inicial igual a 0,4, na escala de -1 a 1) e se desenvolvendo com potencial para alcançar um nível de bem-estar desejado de 0,6.

Tabela 1. Valores dos parâmetros para os Cenários (C), Ambiente Favorável (F), Ambiente Desfavorável (D) e magnitudes de distúrbio de 0; 0,1 e 0,2 usados na simulação do estado do bem-estar animal, ao longo do tempo.

Parâmetros	Ambiente favorável C0F, C1F, C2F*	Ambiente desfavorável C0D, C1D, C2D*
Ambiente favorável	0,7	0,4
Taxa de Ambiente favorável	0,3	0,3
Ambiente desfavorável	0,5	0,7
Taxa de Ambiente desfavorável	0,05	0,2
Tempo Bem-estar desejado	0,6	0,6
Tempo demora	2	2
Tempo distúrbio início	3	3
Tempo distúrbio parar	10	10
Duração do distúrbio	7	7
Magnitudes do distúrbio	0; 0,1; 0,2	0; 0,1; 0,2

*C0F- Cenário sem distúrbio em ambiente favorável; C1F- Cenário com magnitude de distúrbio 0,1 em ambiente favorável; C2F- Cenário com magnitude de distúrbio 0,2 em ambiente favorável; C0D- Cenário sem distúrbio em ambiente desfavorável; C1D- Cenário com magnitude de distúrbio 0,1 em ambiente desfavorável e C2F- Cenário com magnitude de distúrbio 0,2 em ambiente desfavorável.

Consideramos que dois ou mais ambientes podem resultar em um grau similar de bem-estar apesar dos valores diferentes dos componentes ambientais específicos (Newberry & Estevez, 1997). Um exemplo de cenário favorável pode ser um ambiente com temperatura e umidade do ar adequadas ao animal, onde o animal não gastará energia excessiva para regular sua temperatura interna; e um ambiente desfavorável pode ser um ambiente com alta temperatura e umidade que cause desconforto térmico.

Resultados e discussão

Modelo de dinâmica de sistema do bem-estar animal

Os modelos de bem-estar animal podem ser construídos com diversos métodos conforme as questões que se busca responder, entretanto, a modelagem de sistemas e simulações de bem-estar animal é rara na literatura (Collins & Part, 2013). Neste trabalho a dinâmica de sistemas foi usada para construir os modelos conceitual e computacional buscando entender, por meio de simulações em diversos cenários, como os fatores internos e externos influenciam o bem-estar animal ao longo do tempo.

Modelo conceitual

O modelo conceitual (Figura 3) foi construído considerando que o bem-estar animal é um estado contínuo que oscila ao longo do tempo. O animal adaptado mantém sua capacidade de resposta às variações normais do ambiente, mantendo um estado positivo de bem-estar. Quando ocorre um distúrbio ou condições adversas do ambiente, o animal pode não responder adequadamente, mudando para um estado negativo de bem-estar. Em ambos os casos, os níveis de bem-estar tendem a um patamar

conforme o limite determinado pelo *set point* de bem-estar, que corresponde ao padrão desejado para o sistema. O estado desejado de bem-estar direciona a trajetória do sistema conforme os valores, objetivos e expectativas das partes interessadas. Há uma demora na efetivação dos efeitos proporcionados pelos diversos mecanismos de controle (por exemplo, práticas de manejo corretivas) e pela resposta do animal. Consequentemente, ocorrem oscilações no estado de bem-estar de um animal ao longo do tempo. O estado de bem-estar de um animal em qualquer momento pode ser localizado em um contínuo de estados que varia entre bem-estar muito bom e muito ruim, caracterizado como parte do contínuo de bem-estar animal quando há sofrimento (Fernandes et al., 2021; Mellor & Reid, 1994).

No diagrama de ciclo causal, o bem-estar animal é formado por um ciclo de retroalimentação de balanço (B) contendo a variável estado bem-estar cujo valor altera ao longo do tempo em função dos fluxos dos efeitos de fatores ambientais e da ocorrência de distúrbio e as polaridades das influências. O sistema ajusta o estado de bem-estar atual com base no valor do Bem-estar desejado, enquanto houver defasagem haverá motivação para a resposta. A relação defasagem-resposta tem base científica conforme modelo de motivação de Wiepkema (1987), onde o animal consegue avaliar seu estado de vida em um momento no tempo ("*istwer*t", valor atual) e compará-lo com um estado que ele procura ("*sollwe*rt", valor desejado). Há demora na influência da resposta sobre os efeitos, causando oscilação no estado de bem-estar. O gráfico mostra a hipótese dinâmica (crescimento ou decrescimento até um patamar) do comportamento do bem-estar, em um contínuo de estados (eixo ordenadas) ao longo do tempo (eixo das abscissas).

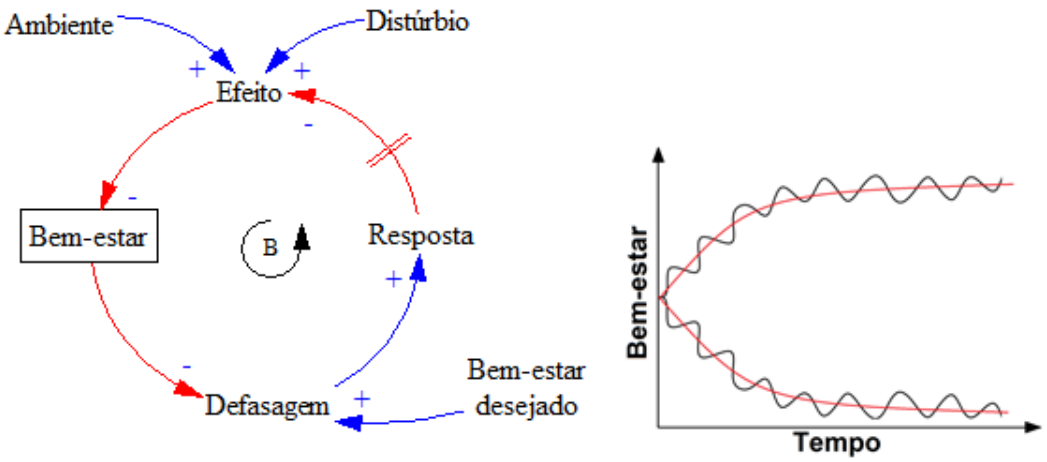

Figura 3. Modelo conceitual genérico da dinâmica do bem-estar animal.

Modelo computacional

No modelo computacional (Figura 4), construído com base no modelo conceitual, o estado de bem-estar do animal, representado pelo compartimento, aumenta com o fluxo de entrada de efeitos positivos a uma taxa/tempo e diminui em função do fluxo de saída de efeitos negativos a uma taxa/tempo. Se as condições permanecerem constantes ao longo do tempo, o estado de bem-estar é estabilizado a um nível estabelecido pelo estado desejado. O efeito de distúrbios sobre a diminuição do estado de bem-estar é representado por um fluxo de saída no intervalo de tempo de início e tempo de parada. Nesse exemplo simples, que possui apenas uma variável estado (bem-estar), a estratégia prática para melhorar o bem-estar animal é reforçar os fatores que influenciam o fluxo de estrada e diminuir os fatores que afetam o fluxo de saída. O ciclo de retroalimentação de balanço controla o nível de bem-estar que estabiliza o sistema, mas na presença de demoras nas respostas do sistema aos efeitos do distúrbio, ocorrem oscilações. Em termos práticos, monitorar e diagnosticar com precisão e rapidez os efeitos de distúrbios e ter flexibilidade no manejo para respostas efetivas e rápidas são ações necessárias para aumentar a resiliência e manter o nível desejado de bem-estar animal no sistema. Em termos de modelagem de dinâmica de sistemas implica na identificação e inclusão de novos ciclos de retroalimentação de balanço.

O modelo contém o algoritmo que calcula os índices de resiliência: dureza, robustez e rapidez de recuperação, elasticidade e índice de resiliência. O índice de elasticidade é obtido com uma série de simulações com ajustes manuais da magnitude do distúrbio, até obter um valor de distúrbio em que o

animal não recupera o estado de bem-estar de sua trajetória normal. O índice de resiliência ($\mathbf{I_R}$) é obtido como função de distribuição de distúrbios para um conjunto de animais, ou um conjunto de projeções para um mesmo animal ao longo do tempo.

As equações que estabelecem relações entre os componentes do modelo computacional são apresentadas no Anexo.

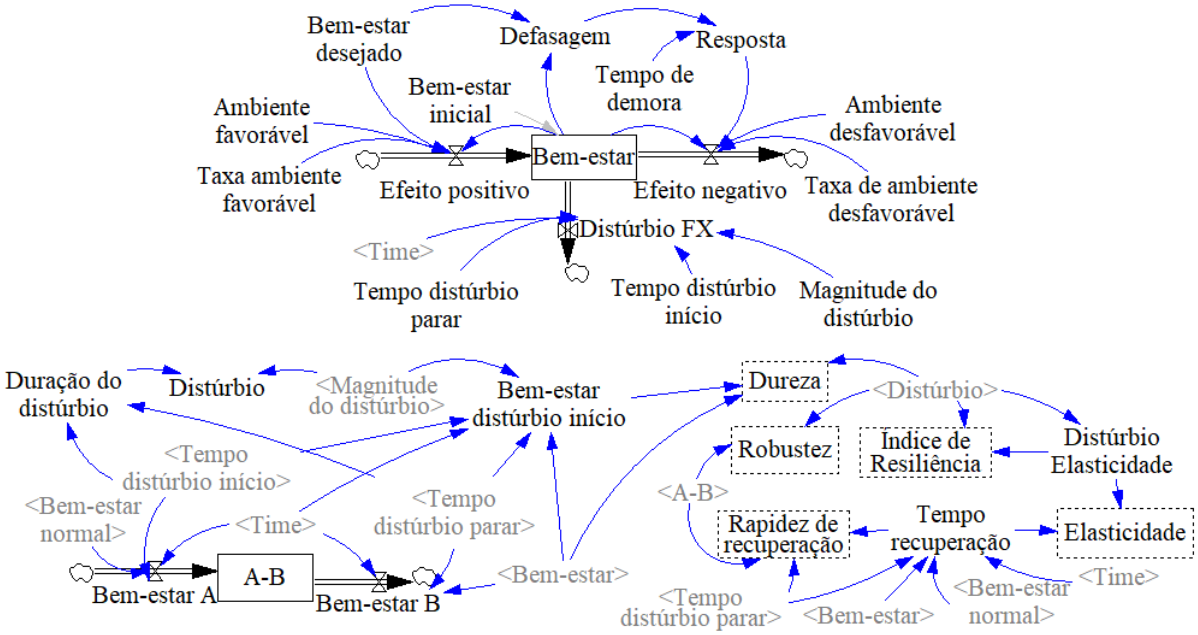

Figura 4. Modelo computacional de bem-estar animal com algoritmo para cálculo de índices de resiliência.

Experimentos in sílico, simulações

As simulações do modelo computacional para cada cenário ambiental projetaram comportamentos do estado de bem-estar animal, ao longo do tempo, caracterizados por perda de bem-estar durante o distúrbio e ganhos de bem-estar no período de recuperação, até alcançar o estado de bem-estar conforme a trajetória projetada de sua evolução (Figura 5).

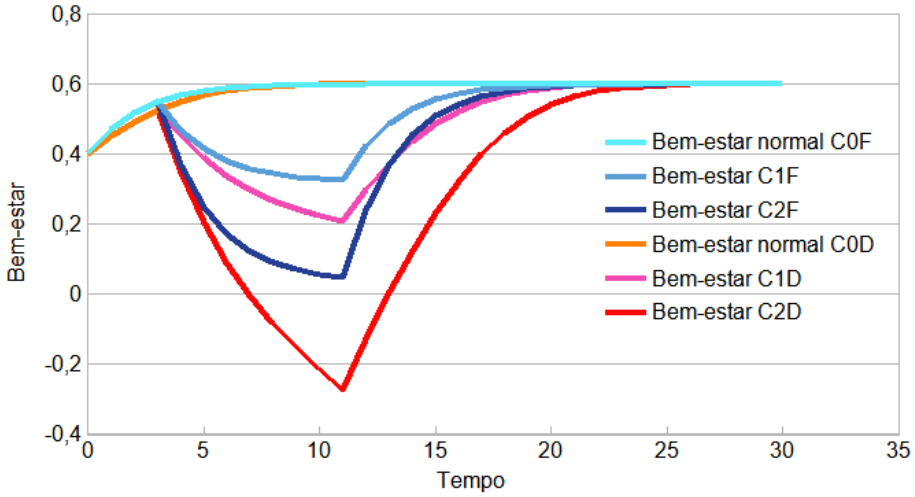

Figura 5. Comportamento do bem-estar ao longo do tempo simulado para cada cenário de intensidade de distúrbio e efeito ambiental. * C0F- Cenário sem distúrbio em ambiente favorável; C1F- Cenário com magnitude de distúrbio 0,1 em ambiente favorável; C2F- Cenário com magnitude de distúrbio 0,2 em ambiente favorável; C0D- Cenário sem distúrbio em ambiente desfavorável; C1D- Cenário com magnitude de distúrbio 0,1 em ambiente desfavorável e C2D- Cenário com magnitude de distúrbio 0,2 em ambiente desfavorável.

Nos cenários C0F e C0D assume-se a condição inicial de nível de bem-estar animal bom (ou positivo) considerando que o animal ou rebanho se encontra em processo de ajuste às condições ambientais

(balanço entre os efeitos positivos e negativos do ambiente sobre o bem-estar), sem a presença de distúrbios, em um dado sistema de produção de leite.

Observa-se que as trajetórias de perda e recuperação do bem-estar nos cenários C1F e C2F diferem devido à magnitude do distúrbio, sendo mais resiliente no C1F do que no C2F. Em situações ambientais menos favoráveis (C1D e C2D), o distúrbio no bem-estar é amplificado. A comparação visual do comportamento dinâmico do bem-estar entre C2F e C1D onde as trajetórias se cruzam é menos exata na detecção de diferenças entre as resiliências do bem-estar. Mas, no caso, pode-se considerar o C1D com maior resiliência do que o C2F, por apresentar menor área de perda de bem-estar. Os indicadores apresentados na Tabela 2 permitem a avaliação da resiliência do bem-estar animal, para as situações do sistema conforme o cenário ambiental.

A duração do distúrbio foi fixada, neste exemplo, em sete unidades de tempo, iniciando no tempo três e terminando no tempo dez. A maior resiliência em termos de duração do distúrbio é eticamente desejada tal como é desejado, por exemplo, o pronto tratamento das podopatias e outros traumas dos animais. Quanto antes o animal for tratado e curado, maior a resiliência do bem-estar. Um sistema que não trata ou oferece recursos que minimizem o distúrbio do animal com bem-estar ruim, tem baixa resiliência e é eticamente inaceitável. Supondo que o sistema vem adotando boas práticas para melhorar o bem-estar, passando de um valor inicial igual 0,4 para o valor desejado de 0,6, no cenário ambiental favorável (C0F) o bem-estar desejado é alcançado em 8 unidades de tempo. Por outro lado, no cenário ambiental desfavorável (C0D) é alcançado em 9 unidades de tempo (Tabela 2).

Os valores de robustez indicam que o sistema sob cenário de ambiente desfavorável tem menor capacidade de manter o estado de bem-estar e que potencializa os efeitos dos distúrbios. Quanto mais robusto, menor é a alteração no estado de bem-estar produzida pelo mesmo distúrbio. Esta relação foi encontrada neste exemplo simulado (Tabela 2). De fato, comparando a robustez de C1F versus C1D e C2F versus C2D (ambientes diferentes com igual magnitude de distúrbio) o bem-estar nos C1F e o C2F foram mais robustos.

Tabela 2. Valores projetados para os indicadores de resiliência em cada cenário ambiental e magnitude de distúrbio.

Parâmetros	Unidade*	Ambiente favorável			Ambiente desfavorável		
		**C0F	C1F	C2F	C0D	C1D	C2D
Tempo Bem-estar desejado	Tempo (t)	8	20	21	9	21	24
Duração do distúrbio	Tempo (t)	-	7	7	-	7	7
Magnitude de distúrbio	Bem-estar/t	-	0,1	0,2	-	0,1	0,2
Distúrbio	Bem-estar/t	-	0,7	1,4	-	0,7	1,4
Dureza	Bem-estar/t		0,001			0,001	
Robustez	Adimensional	-	3,195	2,840	-	2,319	1,888
Rapidez de recuperação	Bem-estar/t	-	0,022	0,045	-	0,027	0,053
Elasticidade	Adimensional		0,553			0,32	
Índice de resiliência	%		55,30%			32,00%	

*O bem-estar animal pode ser mensurado, mas não possui uma unidade específica com base no sistema internacional de unidades. A unidade do bem-estar depende da variável mensurada como variável *proxy*. Este trabalho, por simplificação e generalização, adota unidades de bem-estar, com escala entre -1 a 1, de muito ruim a muito bom. ** C0F- Cenário sem distúrbio em ambiente favorável; C1F- Cenário com magnitude de distúrbio 0,1 em ambiente favorável; C2F- Cenário com magnitude de distúrbio 0,2 em ambiente favorável; C0D- Cenário sem distúrbio em ambiente desfavorável; C1D- Cenário com magnitude de distúrbio 0,1 em ambiente desfavorável e C2D- Cenário com magnitude de distúrbio 0,2 em ambiente desfavorável.

O baixo valor da dureza é devido à suposição do modelo de que um distúrbio de pequena magnitude provoca uma mudança no estado de bem-estar animal. Deve-se considerar que a diferença entre os distúrbios nos pontos A e B se deve tanto à magnitude do distúrbio quanto à capacidade do animal em resistir ao distúrbio. No exemplo (Tabela 2), a dureza do estado de bem-estar é igual no ambiente favorável e desfavorável.

A rapidez com que o animal recupera o estado de bem-estar desejado é uma característica que deve ser considerada na avaliação do bem-estar animal. Quanto mais rápida a recuperação, mais resiliente é o bem-estar dos animais no sistema. Em média, nos cenários favoráveis (C1F e C2F) houve recomposição do nível de bem-estar desejado em 1,10 vezes mais rápido do que nos cenários desfavoráveis (C1D e C2D). Observa-se também que a rapidez de recuperação é maior nos cenários com menor magnitude de distúrbio (C1F e C1D), para a mesma condição do ambiente.

O índice de elasticidade mostra que nos cenários C1F e C2F o animal ou rebanho pode sofrer distúrbios no bem-estar na ordem de 1,73 mais intensos do que nos cenários C1D e C2D, sem perder a capacidade de recuperar o nível desejado de bem-estar.

O índice de resiliência foi o mais efetivo na comparação dos cenários construídos para este exemplo (Tabela 2), mostrando grande diferença de estado de bem-estar do animal entre os cenários favoráveis e desfavoráveis. Nos cenários favoráveis (C1F e C2F) para o bem-estar, a probabilidade de haver ruptura na resiliência do bem-estar foi de 44,7% e nos cenários desfavoráveis (C1D e C2D) a probabilidade de ruptura do bem-estar foi de 68,0%.

Os resultados obtidos corroboram a afirmação de Herrera (2017) de que a dinâmica de sistemas viabiliza a modelagem da resiliência em busca de ações que possibilitem manter o comportamento normal de F(X) quando ocorre um distúrbio. No caso, o comportamento normal de F(X) é o estado de bem-estar dos animais no sistema. Para os cenários (favorável e desfavorável) estudados, considerando não haver controle sobre a magnitude do distúrbio, os resultados das simulações indicaram, como era de se esperar, que a utilização de modificações ambientais secundárias, por exemplo, ventiladores, aumentam o conforto térmico aos animais e, consequentemente, a resiliência do bem-estar. Ou seja, há maior probabilidade de recuperação do estado de bem-estar, para um distúrbio específico, em um ambiente favorável do que no desfavorável. Isto é óbvio, mostrando o potencial da utilização da resiliência como indicador dinâmico do bem-estar de bovinos leiteiros. Mas, diversos desafios devem ser superados no âmbito da pecuária leiteira, principalmente o monitoramento de fatores causadores de distúrbio simultaneamente com a mudança de estado do bem-estar, ao longo do tempo.

A elasticidade da resiliência tem potencial para mostrar a necessidade de adoção de práticas alternativas (ou de adaptação do sistema) na bovinocultura quando não se consegue controlar a ocorrência de distúrbios. O que fazer para melhorar ao longo do tempo o bem-estar animal e sua resiliência na pecuária leiteira? Alguns exemplos são:

- Adotar boas práticas de manejo a fim de reduzir o fluxo de saída (degradação) do bem-estar animal em todas as fases de vida e processos realizados, considerando nutrição, ambiente, saúde, comportamento e estado mental dos animais;

- Uso de sombreamento para impedir aquisição de calor por radiação ou, como no exemplo prático adotado, colocar sistemas de ventilação que podem contribuir para a perda de calor por convecção. A rapidez na resposta para recuperar o estado desejado de bem-estar animal pode ser mais efetiva do que atuar na minimização do distúrbio;

- Enriquecer o ambiente aumentando o fluxo que promove o bem-estar animal, uma vez que o enriquecimento pode ser utilizado para tornar o ambiente mais estimulante aos animais, possibilitando a expressão de comportamentos naturais importantes para a espécie e o controle sobre o ambiente;

- Promover boa relação humano-animal aumentando o fluxo de entrada por meio de interações que geram emoções positivas nos animais e reduzindo emoções negativas como medo, insegurança e frustração.

Quando o sistema é sensível, pequenas alterações no distúrbio (magnitude e duração) causam mudanças no estado de bem-estar animal. Considerando a impossibilidade de eliminar as principais causas de distúrbios, adotam-se soluções que promovam a adaptação (que suportam variações nas condições ambientais). Pesquisas da etologia aplicada vêm contribuindo para responder esta questão e podem se beneficiar do uso dos indicadores de resiliência.

Limitações e trabalhos futuros

Este trabalho propõe a adoção da resiliência como indicador dinâmico de bem-estar animal na pecuária leiteira, que pode ser estendida e adaptada para aplicação com outros animais. O modelo de dinâmica de sistema utilizado é simples, mas suficiente para gerar hipóteses dinâmicas do comportamento de bem-estar animal ao longo do tempo. As trajetórias do bem-estar são modificadas pela ação dos distúrbios em termos de intensidade e duração. O exemplo é genérico e serve como *framework* para operacionalização da resiliência tendo como variáveis de resposta (FX) as variáveis que já estão sendo usadas nos protocolos de avaliação de bem-estar animal, gerando assim diversas formas

de mensurar dinamicamente o bem-estar animal. Aumentar o monitoramento ao longo do tempo do bem-estar dos animais é uma forma de obter dados em séries temporais que geram informações para ações práticas, além de obter medidas com diferentes intensidades de distúrbios.

O índice de resiliência do bem-estar animal tem grande utilidade por permitir comparar os efeitos das ações (ou práticas de manejo alternativas) em busca de melhora no estado do bem-estar. A modelagem da resiliência do bem-estar poderá ser utilizada futuramente para avaliação de *trade-offs* entre eficiência econômica, distúrbio ambiental, restrição ética e bem-estar animal em determinado sistema, ao longo do tempo.

Considerações finais

O carácter dinâmico do bem-estar animal, abrangendo o contínuo no intervalo de estado de bem-estar positivo (muito bom) e negativo (muito ruim), se fundamenta pela sua função biológica, por expressar adaptação ao ambiente e pela mudança de estado em função da intensidade e duração dos distúrbios. Os resultados das simulações mostraram que o estado de bem-estar de um dado sistema (animal ou rebanho) oscila ao longo do tempo e a sua resiliência, que implica na capacidade do animal em manter ou recuperar o estado desejado em situações adversas, é um indicador dinâmico do bem-estar animal na pecuária leiteira.

A modelagem de dinâmica de sistemas viabilizou a operacionalização do conceito de resiliência do bem-estar animal por meio dos índices de dureza, robustez, elasticidade, rapidez de recuperação e índice de resiliência. Os valores destes índices foram aderentes aos conceitos intrínsecos do bem-estar animal e forneceram um conjunto de informações úteis para exemplificar a comparação do estado dinâmico do bem-estar animal em diferentes situações e cenários de distúrbios.

Agradecimentos

A FAPESP (Processo 2014/04416-0) pelo auxílio financeiro.

Referências bibliográficas

Adamie, B. A., & Hansson, H. (2022). Rationalising inefficiency in dairy production: evidence from an over-time approach. *European Review of Agricultural Economics*, *49*(2), 433–471. https://doi.org/10.1093/erae/jbaa034.

Almeida, M. & Bacha, C. (2021). Literatura sobre eficiência na produção leiteira brasileira. Revista de Política Agrícola, 30(1), 20-33. Disponível em: https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1575. Acesso em: 16 Ago. 2022.

Allendorf, J. J., & Wettemann, P. J. C. (2015). Does animal welfare influence dairy farm efficiency? A two-stage approach. *Journal of Dairy Science*, *98*(11), 7730–7740. https://doi.org/10.3168/jds.2015-9390.

Amaral, J. B., & Trevisan, G. (2017). Aspectos da dor e sofrimento no bem-estar de bovinos leiteiros acometidos por podopatias. *PUBVET*, *11*(11), 1074–1187. https://doi.org/10.22256/pubvet.v11n11.1074-1084.

Andrioli, M., Carvalhal, M., Costa, F., & Costa, M. P. (2020). Efeitos da interação humano-animal no bem-estar de ruminantes leiteiros: Uma revisão. *Veterinária e Zootecnia*, *27*, 1–14. https://doi.org/10.35172/rvz.2020.v27.497.

ANUALPEC. (2022). *Anuário da Pecuária Brasileira* (20th ed., Vol. 1). Instituto FNP.

Azevedo, H. H. F., Pacheco, A., Pires, A. P., Mendonça Neto, J. S. N., Pena, D. A. G., Galvão, A. T., Ferrari, E. D. M., Almeida, B. V. B. F., Batista, T. V. L. O., & Araújo, C. F. (2020). Bem-estar e suas perspectivas na produção animal. *PUBVET*, *14*(1), 1–5. https://doi.org/10.31533/pubvet.v14n1a481.1-5.

Bond, B. G., Almeida, R., Ostrensky, A., & Molento, C. F. M. (2012). Métodos e pontos críticos de bem-estar de bovinos leiteiros. *Ciência Rural*, *42*, 1286–1293. https://doi.org/10.1590/S0103-84782012005000044.

Broom, D M. (1986). Indicators of poor welfare. *British Veterinary Journal*, *142*(6), 524–526. https://doi.org/10.1016/0007-1935(86)90109-0.

Broom, D M. (1991). Animal welfare: concepts and measurement. *Journal of Animal Science*, *69*(10), 4167–4175.

Broom, D. M. (1998). Welfare, stress, and the evolution of feelings. Advances in the study of behavior, 27, 371-403. Doi https://doi.org/10.1016/S0065-3454(08)60369-1

Broom, Donald M, & Johnson, K. G. (1993). *Stress and animal welfare*. Springer Science & Business Media.

Can, E., Vieira, A., Battini, M., Mattiello, S., & Stilwell, G. (2017). Consistency over time of animal-based welfare indicators as a further step for developing a welfare assessment monitoring scheme: The case of the Animal Welfare Indicators protocol for dairy goats. *Journal of Dairy Science*, *100*(11), 9194–9204. https://doi.org/10.3168/jds.2ournal017-12825.

Clark, J. D., Rager, D. R., & Calpin, J. P. (1997). Animal well-being II. Stress and distress. *Comparative Medicine*, *47*(6), 571–579.

Collins, L. M., & Part, C. E. (2013). Modelling farm animal welfare. *Animals*, *3*(2), 416–441. https://doi.org/10.3390/ani3020416.

Dawkins, M. S. (2017). Animal welfare and efficient farming: is conflict inevitable? *Animal Production Science*, *57*(2), 201–208.

Doyle, J. K., & Ford, D. N. (1998). Mental models concepts for system dynamics research. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, *14*(1), 3–29. https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199821)14:1<3::AID-SDR140>3.0.CO;2-K.

Fernandes, J. N., Hemsworth, P. H., Coleman, G. J., & Tilbrook, A. J. (2021). Costs and benefits of improving farm animal welfare. *Agriculture*, *11*(2), 1–14. https://doi.org/10.3390/agriculture11020104.

Forrester, J. W. (2013). *Industrial Dynamics*. Eastford, CT: Martino Fine Books, 482 p.

Grandin, T. (2014). Animal welfare and society concerns finding the missing link. *Meat Science*, *98*, 461–469. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.05.011.

Hemsworth, P. H., Mellor, D. J., Cronin, G. M., & Tilbrook, A. J. (2015). Scientific assessment of animal welfare. *New Zealand Veterinary Journal*, *63*(1), 24–30.

Herrera, H. (2017). From metaphor to practice: Operationalizing the analysis of resilience using system dynamics modelling. *Systems Research and Behavioral Science*, *34*(4), 444–462. https://doi.org/10.1002/sres.2468.

Kirchner, M. K., Westerath, H. S., Knierim, U., Tessitore, E., Cozzi, G., & Winckler, C. (2014). On-farm animal welfare assessment in beef bulls: consistency over time of single measures and aggregated Welfare Quality® scores. *Animal*, *8*(3), 461–469. https://doi.org/10.1017/S1751731113002267.

Krueger, A., Cruickshank, J., Trevisi, E., & Bionaz, M. (2020). Systems for evaluation of welfare on dairy farms. *Journal of Dairy Research*, *87*(S1), 13–19. https://doi.org/10.1017/S0022029920000461.

Lerner, H. (2008). The concepts of health, well—being and welfare as applied to animals. A philosophical analysis of the concepts with regard to the differences between animals. Linköping Studies in Arts and Science no. 438. Dissertations on Health and Society no. 13. Linköping University, Linköping, Sweden. 213 p.

Mellor, D. J., & Reid, C. S. W. (1994). Concepts of animal well-being and predicting the impact of procedures on experimental animals. *Well Being International*, *1*, 1–22.

Newberry, R. C., & Estevez, I. (1997). A dynamic approach to the study of environmental. *Applied Animal Behaviour Science*, *54*, 53–57. https://doi.org/10.1016/s0168-1591(96)01207-5.

Norton, T., Chen, C., Larsen, M. L. V, & Berckmans, D. (2019). Precision livestock farming: Building 'digital representations' to bring the animals closer to the farmer. *Animal*, *13*(12), 3009–3017. https://doi.org/10.1017/S175173111900199X.

Ohl, F., & Putman, R. J. (2014). Animal welfare at the group level: more than the sum of individual welfare? *Acta Biotheoretica*, *62*(1), 35–45. https://doi.org/10.1007/s10441-013-9205-5.

Paranhos da Costa, M., & Ceballos, M. C. (2021). Economic and social benefits related to the promotion of dairy and beef cattle welfare. *Revista Facultad Nacional de Agronomia Medellin*, *74*(1), S17–S24.

Paranhos da Costa, M. J. R. (2004). Comportamento e bem-estar de bovinos e suas relações com a produção de qualidade. *Anais Dos Simpósios Da 41a Reunião Da Sociedade Brasileira de Zootecnia*, 260–268.

Richardson, G. P. (1995). Loop polarity, loop dominance, and the concept of dominant polarity (1984). *System Dynamics Review*, *11*(1), 67–88. https://doi.org/10.1002/sdr.4260110106.

Senge, P. M. (2012). *La quinta disciplina en la práctica*. Ediciones Granica SA.

Sorensen, J. T., Hindhede, J., Rousing, T., & Fossing, C. (2002). Assessing animal welfare in a dairy cattle herd with an automatic milking system. *Proceedings of The First North American Conference on Robotic Milking*, 54–59.

Sterman, J. (2000). *Business dynamics*. McGraw-Hill, Inc.

Webster, J. (2016). Animal welfare: Freedoms, dominions and "a life worth living." *Animals*, *6*(6), 35. https://doi.org/10.3390/ani6060035.

Wemelsfelder, F., & Mullan, S. (2014). Applying ethological and health indicators to practical animal welfare assessment. *Scientific and Technical Review*, *33*(1), 111–120. https://doi.org/10.20506/rst.33.1.2259.

Wiepkema, P. R. (1987). Behavioural aspects of stress. In P. R. Wiepkema & P. W. M. Van Adrichem (Eds.), *Biology of stress in farm animals: an integrative approach* (pp. 113–133). Martins Nijhoff Publishers. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3339-2_9.

Histórico do artigo:

Recebido: 5 de outubro de 2022.
Aprovado: 21 de outubro de 2022.
Disponível online: 5 de novembro de 2022.

Licenciamento: Este artigo é publicado na modalidade Acesso Aberto sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 (CC-BY 4.0), a qual permite uso irrestrito, distribuição, reprodução em qualquer meio, desde que o autor e a fonte sejam devidamente creditados.

ANEXO

Equações do modelo computacional

FINAL TIME = 100

INITIAL TIME = 0

TIME STEP = 1

"A-B" = INTEG ("Bem-estar A" - "Bem-estar B", 0)

Ambiente desfavorável = 0.7 Units: [0, 1]

Ambiente favorável= 0.4 Units: [0, 1]

"Bem-estar A" = IF THEN ELSE(Time=Tempo distúrbio início,"Bem-estar normal", 0)

"Bem-estar B" = IF THEN ELSE(Time=Tempo distúrbio parar, "Bem-estar" , 0)

"Bem-estar desejado" = 0.6

"Bem-estar distúrbio início" = "Bem-estar" - IF THEN ELSE(Time>=Tempo distúrbio início :AND: Time<=Tempo distúrbio parar, Magnitude do distúrbio,0) Units: [-1, 1]

"Bem-estar inicial" = 0.4 Units: [-1, 1]

"Bem-estar" = INTEG(Efeito positivo-Distúrbio FX - Efeito negativo, "Bem-estar inicial")

Defasagem = "Bem-estar" - "Bem-estar desejado"

Distúrbio = Magnitude do distúrbio*Duração do distúrbio

Distúrbio Elasticidade = 1*Distúrbio

Distúrbio FX = IF THEN ELSE(Time>=Tempo distúrbio início :AND: Time<=Tempo distúrbio parar, Magnitude do distúrbio,0)

Duração do distúrbio = Tempo distúrbio parar - Tempo distúrbio início

Dureza = IF THEN ELSE("Bem-estar" - "Bem-estar distúrbio início"<>0, Distúrbio, 0)

Efeito negativo = Taxa de ambiente desfavorável*Ambiente desfavorável*Resposta*"Bem-estar"

Efeito positivo = (Taxa ambiente favorável*Ambiente favorável)*(1 - "Bem-estar"/"Bem-estar desejado")

Elasticidade = IF THEN ELSE(Tempo recuperação>0, Distúrbio Elasticidade, 0)

Índice de Resiliência = Distúrbio/1*Distúrbio Elasticidade

Magnitude do distúrbio = 0.2 Units: [0, 1]

Rapidez de recuperação = IF THEN ELSE(Tempo recuperação - Tempo distúrbio parar>0,"A - B"/(Tempo recuperação - Tempo distúrbio parar), 0)

Resposta = DELAY1(Defasagem, Tempo de demora)

Robustez = IF THEN ELSE("A-B"<>0, Distúrbio/"A-B" ,0)

Tempo recuperação = IF THEN ELSE(Time>=Tempo distúrbio parar :AND: ("Bem-estar normal"-"Bem-estar" <0.0051), Time, 0)

Taxa ambiente favorável = 0.3 Units: [0, 1]

Taxa de ambiente desfavorável = 0.2 Units: [0, 1]

Tempo de demora = 2 Units: [0, 10]

Tempo distúrbio início = 3

Tempo distúrbio parar = 10

Tempo recuperação = IF THEN ELSE(Time>=Tempo distúrbio parar :AND: ("Bem-estar normal"-"Bem-estar" <0.0051), Time, 0)