

## OPERACIONALIZAÇÃO DO CONCEITO DE RESILIÊNCIA DE FORRAGEIRAS SOB PASTOREIO ROTATIVO AOS DISTÚRBIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS<sup>1</sup>

L. A. Ambrósio<sup>2\*</sup>, L. M. Toledo<sup>2</sup>, J. B. Demski<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Recebido em 05/04/2018. Aprovado em 19/09/2018.

<sup>2</sup>Instituto de Zootecnia, Centro de Pesquisa de Bovinos de Leite, Nova Odessa, SP, Brasil.

<sup>3</sup>Mestrado em Produção Animal Sustentável, Instituto de Zootecnia, Nova Odessa, SP, Brasil.

\*Autor correspondente: ambrosio@iz.sp.gov.br

**RESUMO:** A resiliência de forrageiras sob pastoreio rotativo aos distúrbios de mudanças climáticas, em particular aos efeitos do déficit hídrico em veranicos, é um atributo básico para alcançar a sustentabilidade do sistema de produção de leite. Este trabalho apresenta um método baseado na dinâmica de sistemas para estimar os índices de resiliência: dureza, robustez, rapidez de recuperação e elasticidade. Um metamodelo para o manejo do ecossistema planta-animal foi adaptado para simular os efeitos dos distúrbios causados por veranicos no estoque de matéria seca dos piquetes. Os resultados dos experimentos *in silico* mostram diferenças entre as resiliências de dois cultivares de forrageiras para uma mesma magnitude de distúrbio e diferenças devido a época de ocorrência do déficit hídrico ser na fase de crescimento da forrageira ou na fase de uso dos piquetes pelos animais. O índice de rapidez de recuperação mostrou aderência conceitual para as condições de pastoreio rotativo, devido à premência de tempo na definição da entrada e saída dos animais nos piquetes. Concluiu-se que a operacionalização e avaliação da resiliência geram informações sobre a dinâmica do estoque de matéria seca ofertada para os animais e que estas informações são úteis para o planejamento do pastoreio rotativo.

**Palavras-chave:** bovino leiteiro, déficit hídrico, dinâmica de sistemas, modelagem, simulação.

### OPERATIONALIZATION OF THE RESILIENCE CONCEPT THE FORRAGE UNDER ROTATIONAL GRAZING TO CLIMATE CHANGE DISTURBANCES

**ABSTRACT:** The resilience of forage under rotational grazing to climate change disturbances, in particular the effects of dry spells is a basic attribute to achieve the sustainability of the dairy cattle production system. This work presents a method based on the system dynamics to estimate the indices of resilience: hardness, robustness, recovery rapidity, and elasticity. A meta-model for the management of the plant-animal ecosystem was adapted to simulate the effects of the disturbances caused by the dry spells in the dry matter stock in the paddocks. The *in silico* experiments results showed differences between the resilience of the two forage cultivars for the same magnitude of disturbance and differences due to the time of occurrence of water deficit in the forage growth phase or in the paddock use phase by the animals. The recovery rapidity index showed a conceptual adherence to the conditions of rotational grazing, due to the time required to define the entry and exit of the animals in the paddock. It was concluded that the operationalization and evaluation of the resilience generated information about the dry matter stock dynamics that are useful for rotational grazing planning.

**Key words:** dairy cattle, dry spells, system dynamics, modeling, simulation.

## INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas estão ocorrendo por causa das atividades antrópicas aceleradas pelo crescimento populacional e pelo modelo de desenvolvimento que usa intensivamente fontes de energia emissoras de gases de efeito estufa, comprometendo o desenvolvimento sustentável (IPCC, 2014). WILBANKS (2010) identificou que a maior necessidade de pesquisa é de melhorar a compreensão de como as ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas podem ser combinadas com trajetórias para o desenvolvimento sustentável e resiliente em uma ampla variedade de contextos regionais e setoriais. Eventos climáticos extremos devido às mudanças climáticas já estão causando distúrbios nos sistemas de produção animal, em particular na bovinocultura leiteira. As projeções para o futuro próximo são de agravamento destes distúrbios, em especial os associados com o aumento da temperatura do ar, concentração das chuvas, maior período de seca e maior frequência de veranicos. O veranico é considerado, neste trabalho, como uma forma de déficit hídrico para as plantas forrageiras em que a seca que causa distúrbios nas plantas é condicionada pela ausência de precipitação na estação úmida. LACERDA et al. (2009) relataram aumento na frequência e duração dos veranicos associados a mudança climática no semiárido brasileiro. CARVALHO ET AL. (2013) mostraram aumento de veranico na região do cerrado (Centro-Oeste) e diminuição no Sul e Sudeste do Brasil.

O conceito de sustentabilidade está amplamente consolidado na pecuária, porém para alcançar a sustentabilidade é necessário construir a resiliência dos sistemas de produção. De modo simplificado, a resiliência de um sistema implica na sua capacidade de responder a um distúrbio externo. Assim, se o sistema de produção de leite não for resiliente aos distúrbios climáticos também não será sustentável.

Neste contexto, a resiliência é um conceito dinâmico básico para identificar os sistemas de produção com alto potencial de reorganização e de adaptação. Mas, ainda, a resiliência é ignorada nas atividades da pecuária leiteira. HERRERA (2017) aponta algumas causas que dificultam a aplicação do conceito de resiliência

na tomada de decisões. Uma das dificuldades é a existência de conceitos diferentes de resiliência que geram diversas interpretações disciplinares (GUNDERSON, 2000). Também, não existe uma maneira clara de analisar e estimar a resiliência de um sistema (TODMAN ET AL., 2016). Dado que as resiliências dos sistemas de produção são dinâmicas, suas análises requerem o uso de modelos e simulações para gerar respostas comportamentais dos sistemas em diferentes cenários de distúrbios. Desenvolver a prática da modelagem como ferramenta auxiliar para a análise de problemas complexos da pecuária leiteira, tal como a resiliência, é um desafio a ser superado.

Este trabalho buscou respostas para uma questão geral e metodológica de como proceder para medir e analisar a resiliência dos sistemas de produção de leite afetados por distúrbios das mudanças climáticas em conformidade com os princípios zootécnicos e gerenciais que norteiam o manejo de pastoreio rotativo. As resiliências das forrageiras aos distúrbios do veranico que afetam a oferta e o consumo de matéria seca (MS) foram estimadas usando o método para operacionalização<sup>1</sup> da resiliência em sistemas dinâmicos (HERRERA, 2017).

Os objetivos específicos foram: Simular a dinâmica da produção de MS em piquetes com dois cultivares de capim nos cenários de veranico, usando o modelo proposto para o manejo do ecossistema planta-animal (MEPA); e estimar e avaliar os indicadores de resiliência para os cultivares em pastoreio rotativo.

## MATERIAL E MÉTODOS

*Experimento de pastoreio rotativo com capins Convert e Marandu*

A base de dados usada na simulação do acúmulo de matéria seca nos piquetes foi gerada na fase de pré experimento de competição entre cultivares capim-marandu (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu (Hochst ex. A. Rich) Stapf.) e capim-convert HD364 (*Brachiaria* híbrida CIAT 36087) sob pastoreio rotativo com bovinos leiteiros, no Centro de Pesquisa de Bovinos de Leite, em Nova Odessa, Estado de São Paulo. Na fase de pré experimento foram alocadas 10 vacas em lactação em 14 piquetes de 1428,5 m<sup>2</sup>, taxa de lotação de 5,8 UA/ha, por cultivar para pastejar sob lotação rotativa com

<sup>1</sup> Operacionalização significa definir medidas indiretas de.

uso de frequência de desfolhação baseada em dias fixos. Ou seja, os animais entravam nos piquetes a cada 28 dias onde permaneciam por 2 dias, durante os meses de março e abril de 2011. A altura do dossel forrageiro foi mensurada como variável-resposta, a altura pré-pastejo foi de 40 cm e a altura pós-pastejo de 20 cm para ambos os cultivares (DEMSKI ET AL., 2011). Dados médios dos piquetes foram usados para estimar os valores dos parâmetros do modelo usados para obter a curva de crescimento dos cultivares sob pastoreio rotativo, Tabela 1.

**Tabela 1** - Valores dos parâmetros usados na simulação do modelo para gerar curva de crescimento de referência dos cultivares, médias dos piquetes, com base em DEMSKI ET AL. (2011).

Parâmetros	Convert	Marandu
Matéria seca máxima (kg)	3978	3468
Matéria seca inicial entrada (kg)	2100	1948
Taxa de crescimento (kg/dia)	0,075	0,058
Taxa senescência e perda (kg/dia)	0,0017	0,0020
Capacidade de ingestão (kg/dia/animal)	18	18

#### *Operacionalização do conceito de resiliência*

A resiliência é um conceito central em questões relacionadas com as mudanças climáticas. Para o IPCC (2007) a resiliência é definida como a capacidade de um sistema social ou ecológico para absorver distúrbios, mantendo a mesma estrutura básica e o modo de funcionamento, a capacidade de auto-organização e a capacidade de adaptação ao estresse e à mudança. CARPENTER ET AL. (2001) desenvolveram o conceito de resiliência sócio-ecológica, adotando uma perspectiva ampla integrando os seguintes parâmetros: (1) A quantidade de distúrbios que um sistema pode absorver e permanecer no mesmo estado; (2) o grau de auto-organização que o sistema é capaz e (3) o grau em que um sistema pode construir ou aumentar sua capacidade de aprendizagem e adaptação. Como mostram estas definições, dentre muitas outras existentes na literatura, a resiliência é um conceito contextualizado.

Assim, para compreender a resiliência de um sistema, deve-se começar definindo claramente a resiliência em termos do que e para que (*resilience of what to what*) conforme CARPENTER ET AL. (2001).

Para fins de estabelecer estratégias para desenvolver a resiliência da pecuária leiteira, neste trabalho a resiliência é definida como sendo o potencial dinâmico de um arranjo particular de um sistema de produção de leite para manter e/ou recompor suas estruturas (componentes dos capitais: rebanho, pastagem, solo, água, construções, recursos humanos, sociais e financeiros) e funções (produção de leite e animais, geração de renda e emprego, prover serviços ecossistêmicos, proporcionar bem-estar animal e contribuir para a segurança alimentar) quando e enquanto for afetado por um distúrbio, em particular os eventos climáticos extremos (seca e inundação, ondas de calor, frentes frias, granizo, raios, vendavais e tornados) associados com as mudanças climáticas.

No contexto de sistemas complexos e não lineares a resiliência é dinâmica (dependente do tempo). Por isso, o método de Dinâmica de Sistemas (STERMAN, 2000) foi usado para simular as respostas do sistema aos distúrbios e para analisar as estruturas causais associadas a essas respostas, ao longo do tempo. As simulações do modelo, em função do tempo, geraram os valores dos parâmetros para diversas magnitudes do distúrbio usados nos cálculos para a operacionalização da resiliência.

#### *Indicadores de resiliência*

Devido à dificuldade em se medir a resiliência, HERRERA (2017) propôs a sua quantificação com base nos atributos mensuráveis relacionados com a resiliência do sistema, mas que expressem o comportamento dos resultados desejados do sistema (produtos). Os indicadores propostos por HERRERA (2017) foram:

Dureza ( $\sigma_p$ ) é a capacidade do sistema para resistir a um distúrbio ( $\sigma$ ) sem apresentar uma mudança no desempenho da função  $F(X)$  do resultado. Quanto maior o valor da dureza, maior é o distúrbio necessário para produzir qualquer alteração no comportamento do sistema.

Rapidez da Recuperação ( $\bar{R}$ ): é a taxa média

em que um sistema retorna ao equilíbrio após um distúrbio ( $\sigma$ ). Quanto maior a ( $\bar{R}$ ), mais rápido o sistema recupera-se após o distúrbio.

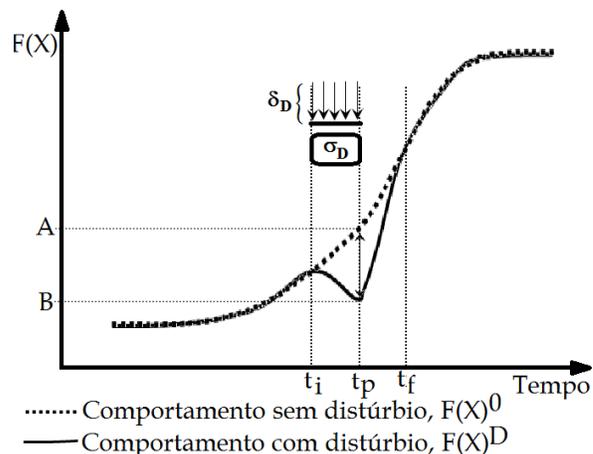
Robustez ( $\bar{\rho}$ ) é a capacidade do sistema para suportar grandes distúrbios ( $\sigma$ ) sem perda significativa de desempenho. Quanto mais robusto o comportamento da  $F(X)$ , menor é a mudança produzida pelo mesmo distúrbio.

Elasticidade ( $\sigma_E$ ) é a capacidade do sistema para resistir a um distúrbio ( $\sigma$ ) sem alterar 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.

Neste trabalho, foram considerados como resultados do sistema as quantidades de matéria seca ofertada e consumida pelos animais expressas por funções  $F(X)$  do resultado quantificável e dependente do tempo. A  $F(X)_t$  do acúmulo de MS no piquete, por hipótese, é uma função de crescimento sigmoide. VOISIN (1988) observa que a produção de forragem segue um padrão de crescimento sigmoide ou "em forma de S" (Figura 1) em que o crescimento é lento nos estágios iniciais do crescimento da planta, aumentando rapidamente durante o período intermediário e diminuindo novamente à medida que as folhas senescem e morrem. Este padrão de crescimento determina o tempo necessário para a planta forrageira se recuperar do pastoreio em função de condições ambientais. Em condições de umidade e temperatura adequadas o crescimento é acelerado requerendo menor tempo de recuperação quando comparado com condições severas que exigem períodos de descanso mais longos antes do próximo pastejo.

Para medir os indicadores de resiliência para o comportamento de  $F(X)$  da Figura 1, os parâmetros foram estimados em experimentos *in silico* usando as seguintes equações, conforme HERRERA (2017):

1) A função  $F(X)$  do resultado é representada pelo estoque de matéria seca em cada piquete, ao longo do tempo. O comportamento da  $F(X)^0$  foi estimado no modelo computacional considerando que não há distúrbio ( $\delta = 0$ ). Este comportamento pode estar em equilíbrio (representado por uma linha horizontal) ou pode exibir um padrão sigmoide como mostrado na Figura 1. Os efeitos do veranico sobre as



Fonte: Figura modificada de HERRERA (2017).

**Figura 1** - Comportamentos de  $F(x)$  do resultado sendo o comportamento do sistema sem distúrbio com comportamento com resposta hipotética do sistema para um distúrbio ( $\sigma$ ) com magnitude ( $\delta$ ) e duração ( $tp - ti$ ). Onde,  $ti$  é o tempo de início em que o distúrbio afeta o sistema;  $tp$  é o tempo em que o distúrbio para de afetar o sistema; e  $tf$  é o tempo no qual o sistema se recupera totalmente.

forrageiras foram considerados como distúrbio ( $\sigma$ ). O distúrbio ( $\sigma$ ) foi calculado como o produto da magnitude do distúrbio ( $\delta$ ) e a duração do distúrbio ( $tp - ti$ ), conforme a Equação (1).

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

2) Nas simulações, os tempos  $ti$  e  $tp$  foram escolhidos para coincidirem com as fases críticas do desenvolvimento das forrageiras nos piquetes. Tendo como base os valores encontrados na literatura sobre efeito da seca em pastoreio rotativo (DEGOLA ET AL., 2011; MINUZZI E CARAMORI, 2011; MAHLMEISTER ET AL., 2014; ROLDÃO, 2015). A  $F(X)$  foi estimada em função do consumo de MS em cada piquete. Para medir a dureza ( $\sigma_D$ ) em cada rodada de simulação os valores de  $ti$  e  $tp$  foram mantidos constantes, a magnitude do distúrbio ( $\delta$ ) foi modificada e o distúrbio ( $\sigma$ ) foi ajustado manualmente. O menor distúrbio ( $\sigma_D$ ) é o que produz uma função de resultado diferente ( $F(X)^D \neq F(X)^0$ ). Observe na Figura 1 que a  $F(X)^D$  se iguala a  $F(X)^0$  no tempo  $tf$  (restauração). Este distúrbio ( $\sigma_D$ ) representa a dureza do sistema e é calculado usando a Equação (2).

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

3) Novas simulações, aumentando a magnitude do distúrbio ( $\delta$ ) e mantendo  $t_i$  e  $t_p$  constantes geraram um comportamento  $F(X)^E$  que não restaurou o  $F(X)^0$ , Figura 1. Isto é, com esta alta magnitude de distúrbio não se reproduziu a tendência original do comportamento do sistema. Assim, foi obtido o indicador Elasticidade ( $\sigma_E$ ) que é o distúrbio que produz  $F(X)^E$  (a quantidade de distúrbio necessária para mover o sistema para um equilíbrio diferente) calculado usando a Equação (3):

$$\text{Elasticidade } \sigma_E = \delta_E \times (t_p - t_i)$$

Equação (3)

4) Para obter estimativas dos indicadores Robustez e Rapidez de recuperação, em cada rodada da simulação, com diferentes  $\delta$  ajustados manualmente, sendo registrados os valores de  $\delta$ , A, B,  $t_f$  e  $t_p$  para calcular ( $\bar{R}$ ) e ( $\bar{\rho}$ ) como médias aritméticas dos valores obtidos nas rodadas de simulação, usando as Equações (4 e 5),

$$\text{Rapidez de recuperação } \bar{R} = \frac{(A-B)}{(t_f - t_p)}$$

Equação (4)

$$\text{Robustez } \bar{\rho} = \frac{\sigma}{(A-B)}$$

Equação (5)

Os valores de A e B da  $F(X)$  foram estimados em função do estoque de MS em cada piquete por cultivar. As médias de R foram estimadas em termos de ganhos de MS por piquete por cultivar por tempo de recuperação.

Deve-se notar que o procedimento de alterar manualmente os valores da magnitude do distúrbio ( $\delta$ ) em diversas rodadas de simulação consiste de um experimento *in silico* para gerar uma amostra de valores dos parâmetros usados nos cálculos dos indicadores de resiliência. Isto foi necessário devido à dificuldade de se obter tais valores com medições reais (a campo) com diferentes comportamentos de  $F(X)$  de resposta onde a magnitude do distúrbio não é controlada.

#### Modelo MEPA

Um metamodelo para o manejo do ecossistema planta-animal (MEPA) foi construído de forma participativa a fim de se construir consenso sobre o manejo deste sistema complexo (AMBRÓSIO ET AL., 2008). Além da

visão das partes interessadas, este metamodelo incluiu algoritmos contidos em outros modelos de sistemas de pastagem publicados na literatura. A modelagem com enfoque modular flexível permite construir modelos dos subsistemas atendendo as especificidades das estruturas e processos envolvidos na análise da dinâmica de problemas complexos do manejo do ecossistema planta-animal. Os modelos dos subsistemas foram conectados para construir o metamodelo do sistema (AMBRÓSIO ET AL., 2008).

O software de simulação Simile® usado na modelagem apresenta comandos que facilitam a construção e a modificação dos diagramas de estoques e fluxos, VANCLAY (2003). O elemento *Association Submodels* do Simile permite incluir, com pouco esforço, as relações matemáticas e lógicas entre submodelos necessárias para se efetuar mudanças dinâmicas entre as variáveis de diferentes classes.

O diagrama sistêmico do MEPA, Figura 2, contém dois submodelos inter-relacionados: Piquete e Animal (AMBRÓSIO ET AL., 2008). O elemento *Association Submodels* chamado de Rotacionar contém o algoritmo para rotacionar os animais nos piquetes. No submodelo Piquete supõe-se que o estoque de massa de forragem ofertada em cada piquete, no tempo  $t$ , é função: (a) da taxa de crescimento específica para cada espécie e cultivar de planta forrageira (composição botânica), das condições edafoclimáticas e da adubação; (b) do consumo de massa de forragem que depende da quantidade ingerida por animal, da quantidade de animais e da massa de forragem ofertada; e (c) das perdas causadas pelos próprios animais e da taxa de senescência da planta. No modelo há retroalimentação negativa do efeito do pastejo dos animais sobre a estrutura do pasto. O pastoreio é iniciado no piquete que melhor atender ao critério zootécnico que permite otimizar a produção e o consumo de forragem para a produção de leite, neste modelo representado pela altura do dossel. O ciclo de pastoreio é considerado um processo contínuo formado pela soma dos dias de pastoreio e dos dias de descanso. O ciclo de pastoreio se ajusta à quantidade de animais, quantidade de piquetes e estrutura do pasto. DEMSKI ET AL. (2011) utilizaram estes submodelos do MEPA para analisar a dinâmica do acúmulo

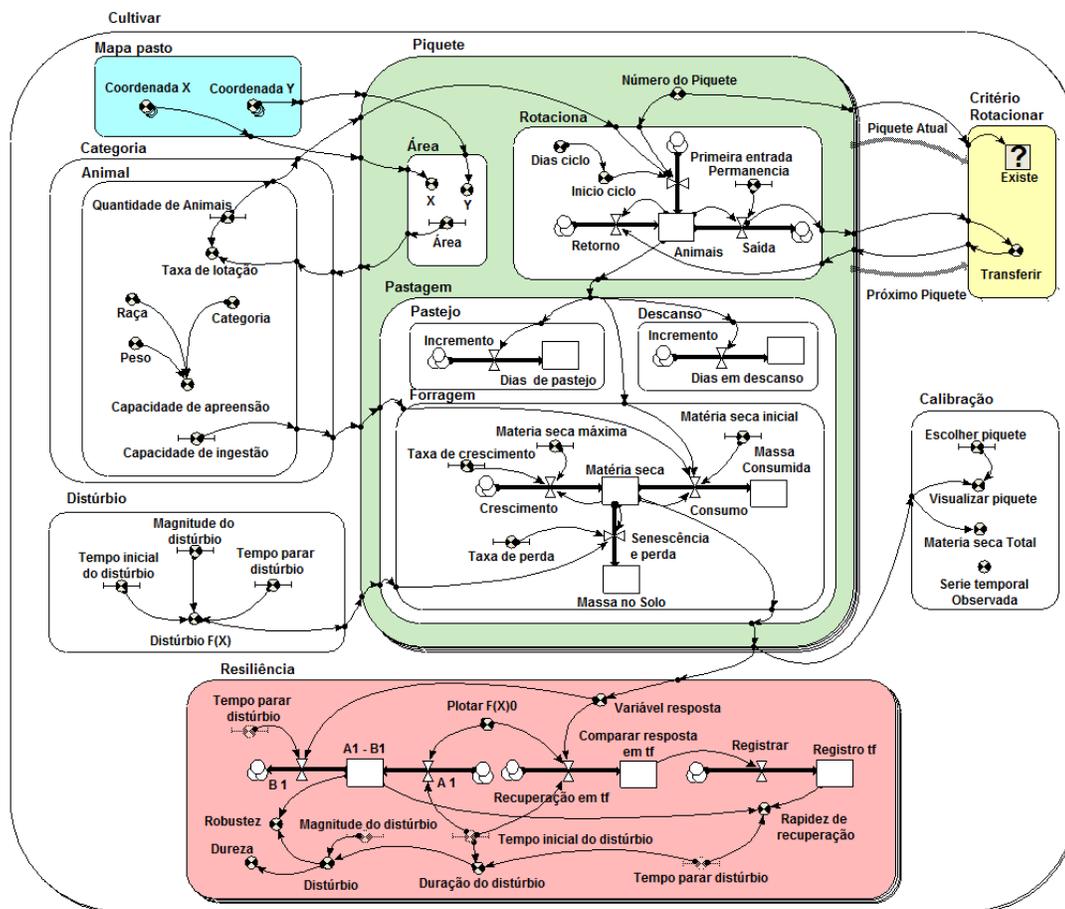


Figura 2 - Diagrama estoque fluxo do Submodelo Piquete-Resiliência com os submodelos Resiliência e Distúrbio.

de forragem, em termos de MS disponível nos piquetes formados pelos cultivares Marandu e Convert, sob o cenário de ciclo de pastoreio com dias fixos.

Neste trabalho, os submodelos Piquete e Animal do MEPA (Figura 2) foram usados para simular a dinâmica da produção de matéria seca dos cultivares Convert e Marandu nos cenários base e com distúrbios nas respectivas taxas de crescimento devido ao déficit hídrico provocado por um veranico. O subsistema Resiliência foi incluído para calcular os índices de resiliência para os diversos cenários de veranico incluídos no submodelo Distúrbio.

*Experimentos in silico de efeito de déficit hídrico no estoque de matéria seca*

Neste trabalho interessa entender, por meio de técnicas de modelagem, os efeitos do veranico sobre as forrageiras em termos dos processos de crescimento e recuperação do estoque de matéria seca durante e após o

período de déficit hídrico.

Experimento conduzido por SILVA (2013) mostrou que plantas de *Panicum maximum* sob déficit hídrico por 12 dias tiveram período de 15 dias para a recuperação. Após a recuperação, não se observou diferença significativa nem para altura nem para massa verde da parte aérea, mostrando que todas as cultivares de *Panicum sp* se recuperaram nessas características. Os cultivares Tanzânia e Mombaça mostraram redução significativa na altura já no oitavo dia de déficit hídrico, além de apresentarem redução na massa verde da parte aérea, mas não na massa seca.

Estas informações foram usadas para criar cenários, nos experimentos *in silico*, que quantificam a magnitude do distúrbio do déficit hídrico que afeta o fluxo de crescimento da forrageira. As resiliências dos cultivares foram estimadas para as condições climáticas que mimizam os efeitos do déficit hídrico que causam distúrbios no estoque de MS

**Tabela 2** - Cenários de distúrbio usados na estimativa dos índices de resiliência, nos experimentos *in silico*.

Parâmetros	Cenários de veranico								
	Base	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Magnitude do distúrbio	0	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5
Início do distúrbio	0	30	30	30	30	80	80	80	80
Duração do distúrbio	0	5	5	10	10	5	5	10	10
Distúrbio	0	1,0	2,5	2,0	5,0	1,0	2,5	2,0	5,0

dos piquetes por meio da redução na taxa de crescimento em relação às condições de disponibilidade de água favorável para o crescimento das forrageiras. As resiliências foram avaliadas em nove cenários (Tabela 2) formados por níveis de magnitude do distúrbio (efeito de 20 e 50% de redução do crescimento), duas épocas de início do distúrbio (aos 30 e 80 dias após plantio) e dois períodos de duração do distúrbio (5 e 10 dias), além do cenário base. Estes cenários representam os distúrbios com valores entre 1 e 5 devido ao déficit hídrico do veranico.

## RESULTADOS

As medidas de resiliência foram calculadas usando o comportamento de uma  $F(X)$  de resposta, em termos de estoque de MS das forrageiras com pastoreio rotativo simulado no submodelo Piquete do modelo MEPA. Este submodelo que representa o sistema de produção de forrageira foi incrementado com as equações propostas por HERRERA (2017) para obter estimativas dos indicadores de resiliência. O novo submodelo permitiu realizar experimentos *in silico* para obter resposta do sistema as diferentes magnitudes de distúrbio. Além do que, nas simulações os parâmetros do modelo computacional foram alterados manualmente, assumindo-se a mesma probabilidade de ocorrência para todos os parâmetros de distúrbios testados.

### *Dinâmica do estoque de forragem nos piquetes*

As simulações do modelo geraram informações do estoque de matéria seca das forrageiras ofertada por piquete por unidade de tempo (dias) apresentadas em gráficos com o comportamento dinâmico da MS para cada cultivar.

Na Figura 3, observam-se diferenças entre as curvas de MS dos 14 piquetes do cenário de distúrbio devido ao déficit hídrico mais brando

C1 (linhas coloridas) e do cenário base (C0 - linha cor preta). Houve diferenças no estoque de MS entre C0 e C1 para ambos os cultivares. Para o Marandu a diferença máxima foi de 146 kg de MS/ha e para o Convert foi de 201 kg de MS/ha, no período de crescimento. Porém, ambos cultivares apresentaram alta resiliência, para as condições deste cenário, porque o distúrbio não interferiu na oferta de forragem no momento de uso dos piquetes (Figura 4).

No cenário C8, com déficit hídrico mais severo, observa-se (Figura 5) que o cultivar Convert foi resiliente, em termos de produção esperada de MS, embora sofrendo os efeitos do distúrbio de veranico, teve recuperação da matéria seca a tempo de possibilitar o pastoreio do piquete. O cultivar Marandu teve baixa resiliência (Figura 6) porque em 11 piquetes o estoque de matéria seca, no segundo ciclo de rotação, foi afetado pelo distúrbio restringindo o pastejo por dois dias consecutivos.

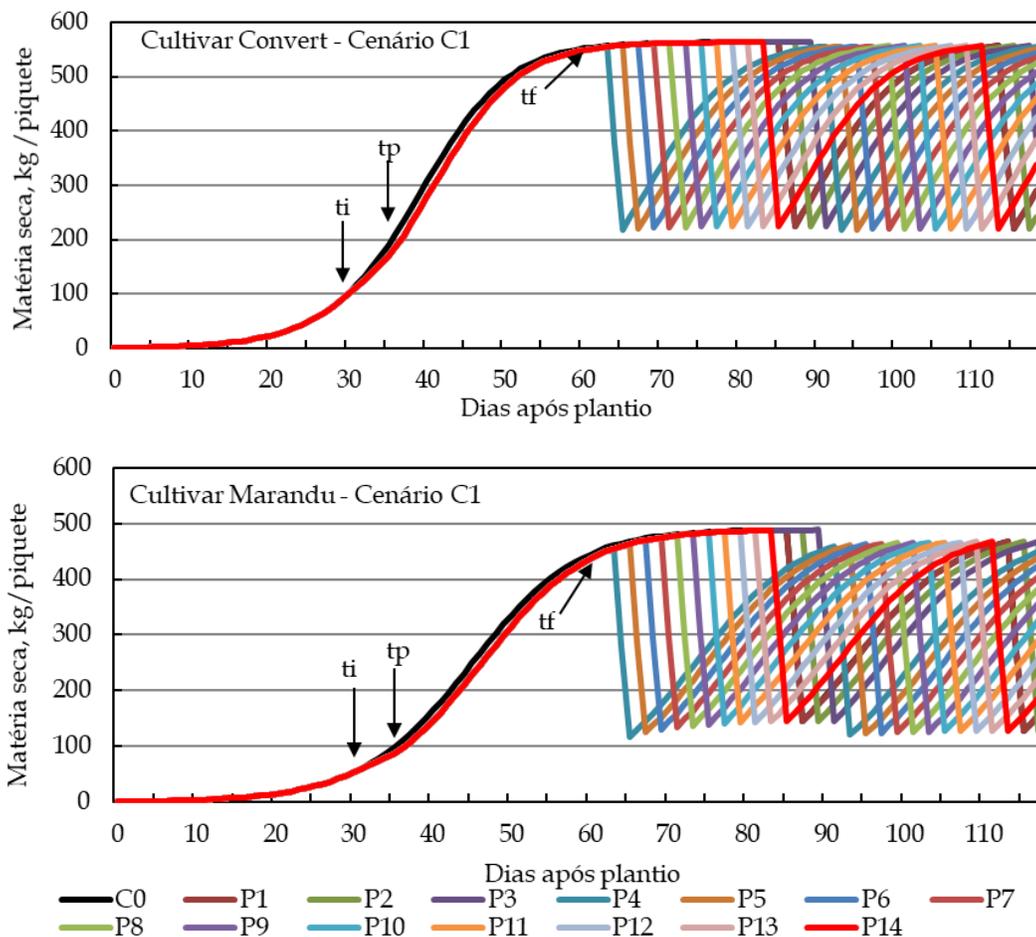
Os distúrbios do déficit hídrico no cenário 8 causaram perda significativa na quantidade de alimento consumido pelos animais, medido em termos de matéria seca, para o cultivar Marandu (Figura 6) durante o segundo ciclo de rotação.

### *Indicadores de resiliência*

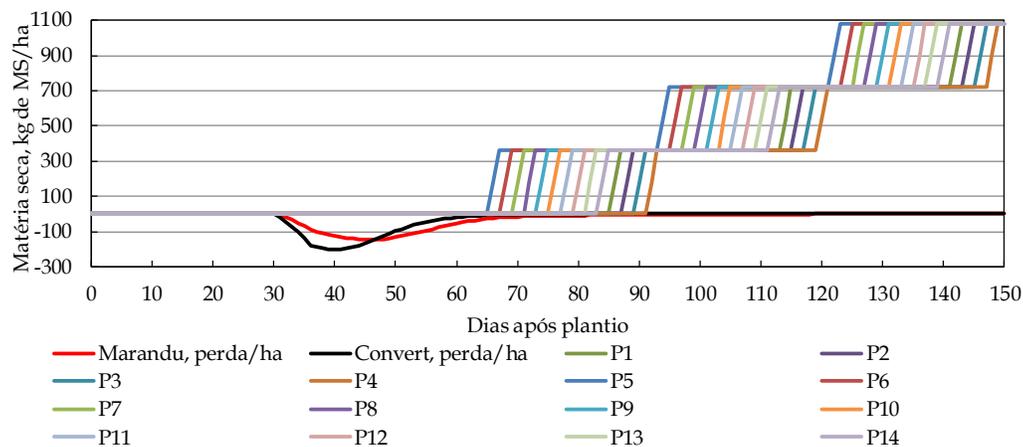
A Dureza dos cultivares ao distúrbio devido ao déficit hídrico foi estimada para o estoque de MS consumida em cada piquete nos dias de uso por ser a função resposta  $F(X)$  de interesse zootécnico para avaliar o desempenho do sistema de pastoreio rotativo (Tabela 3). Considerou-se a menor magnitude do distúrbio que impede o pastoreio em dois dias consecutivos programados para a entrada dos animais no piquete.

A robustez foi estimada em função da perda de MS durante o distúrbio em cada cenário, para ambos os cultivares (Tabela 4).

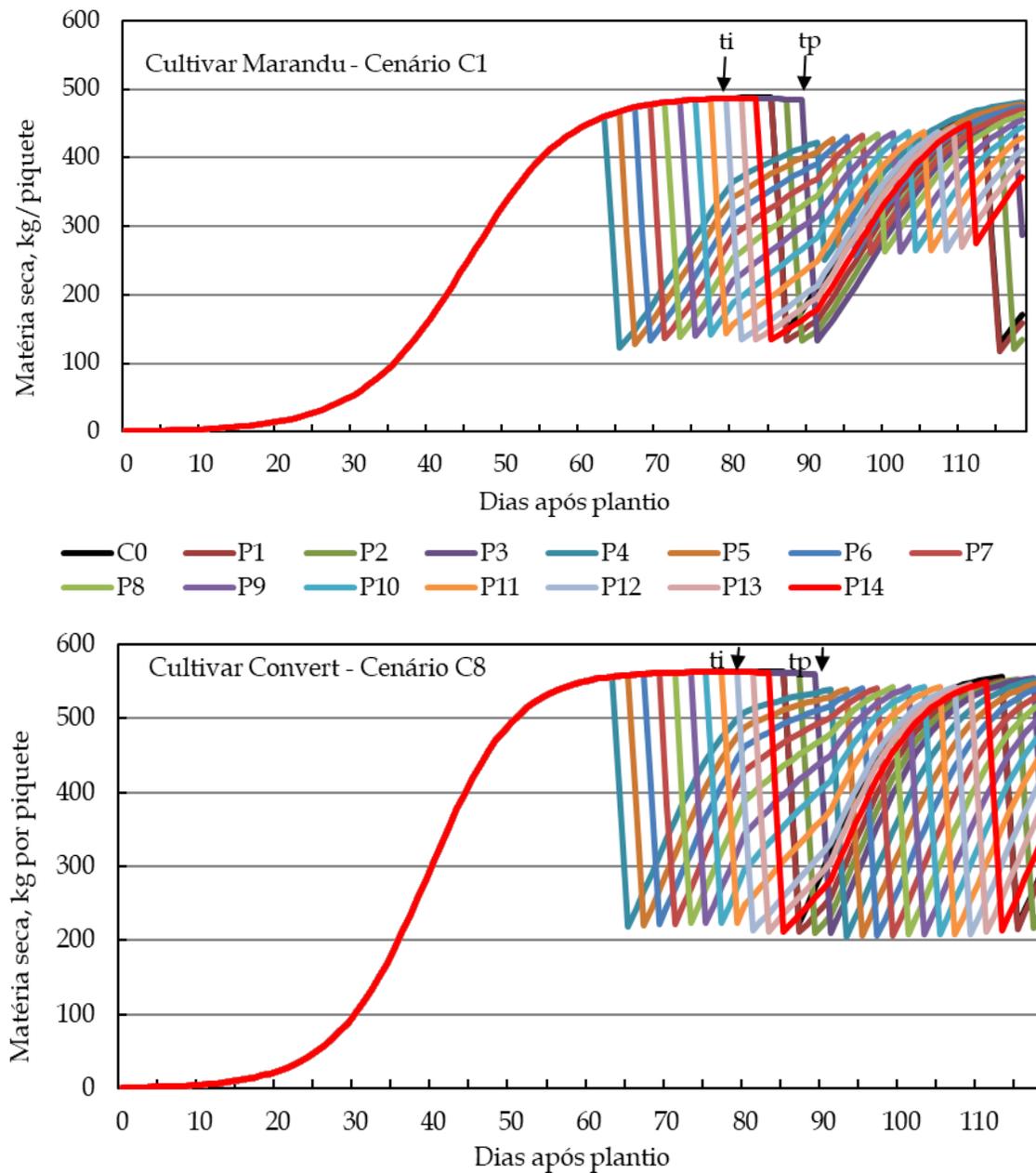
Para obter a estimativa da elasticidade



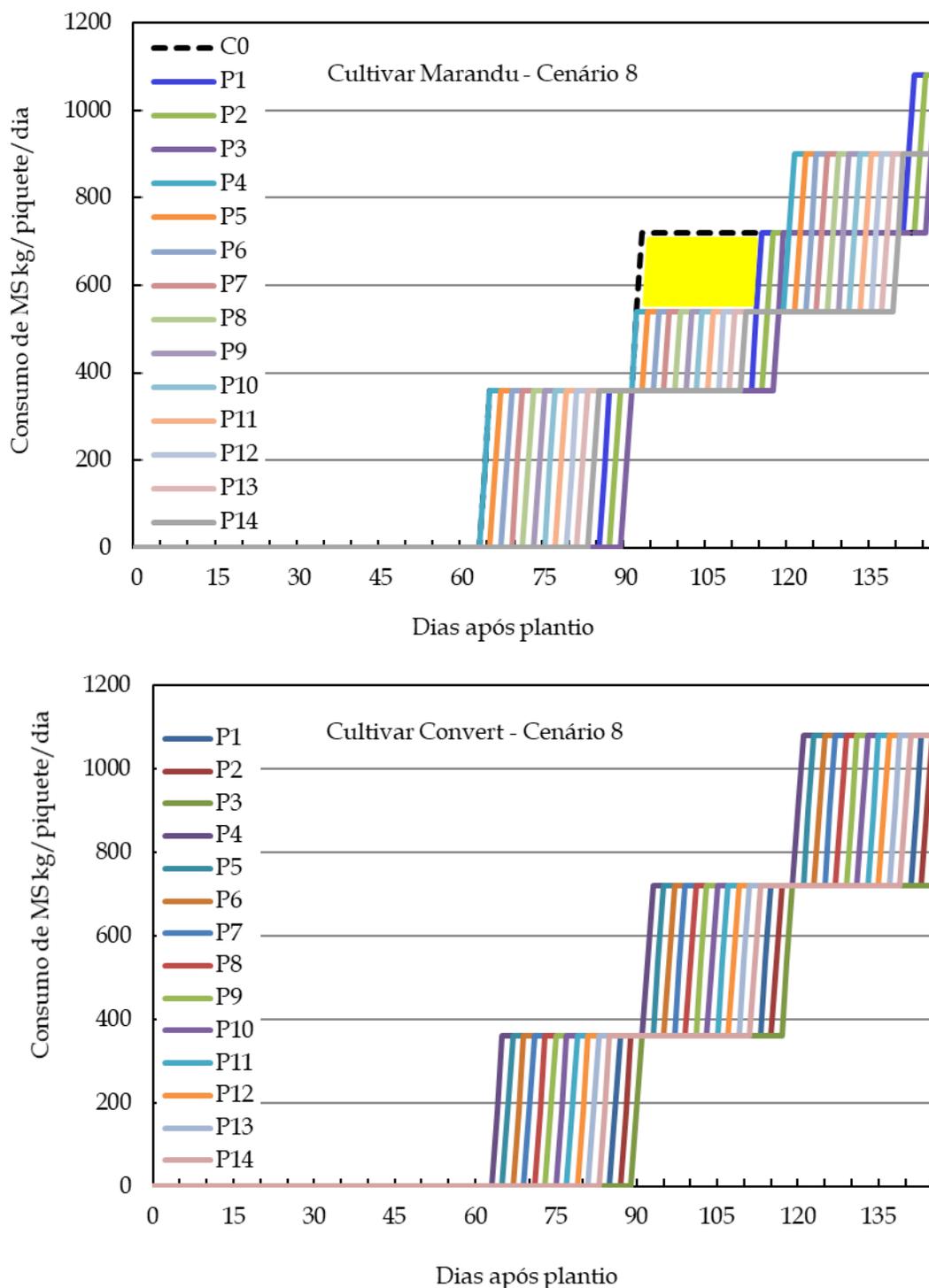
**Figura 3** - Estoques de matéria seca simulados para os 14 piquetes para o cenário C1 para os cultivares Convert e Marandu, linhas coloridas. A curva de cor preta indica o crescimento da MS para o cenário base (sem distúrbio) para todos os piquetes. A curva vermelha indica o crescimento da MS no piquete P14 que se sobrepõe nas curvas dos demais piquetes antes do pastejo iniciado aos 65 dias no piquete P4. As demais curvas se referem aos piquetes conforme legenda. O tempo  $t_i$  indica o início do distúrbio (30 dias após plantio),  $t_p$  indica o final do distúrbio (35 dias após plantio) e  $t_f$  é o tempo no qual o sistema se recupera totalmente (65 dias após plantio).



**Figura 4** - Consumo de matéria seca pelos animais por período de uso de cada piquete no cenário C1, igual para os cultivares e perdas em kg de MS / ha para ambos cultivares, após o distúrbio iniciado no dia 30 após plantio.



**Figura 5** - Simulação da matéria seca dos piquetes para o cenário 8, o déficit hídrico ocorre no período de uso dos piquetes, para os cultivares Marandu e Convert. A curva preta indica o crescimento da MS para o cenário base (sem distúrbio) para todos os piquetes. A curva vermelha indica o crescimento da MS no piquete número 14 (P14) que se sobrepõe os demais piquetes antes do pastejo iniciado aos 65 dias no piquete número 4 (P4). As demais curvas se referem aos respectivos piquetes conforme legenda. O evento ti indica o início do distúrbio (80 dias após plantio) e tp indica o final do distúrbio (90 dias após plantio).



**Figura 6** - Simulação da matéria seca consumida nos piquetes para o cenário 8 para os cultivares Marandu e Convert em três ciclos de pastoreio. O distúrbio devido ao déficit hídrico ocorre no período de uso dos piquetes entre os 80 e 90 dias após o plantio. A área amarela indica a perda de resiliência do cultivar Marandu em termos de forragem consumida por não possibilitar a rotação com dias fixos, exigindo decisões de alteração no manejo tais como sobrepastagem, diminuição da lotação, uso de área de reserva, suplementação com volumosos entre outras.

**Tabela 3** - Indicador de resiliência: Dureza dos cultivares em termos de quantidade de MS consumida por piquete para os cenários de duração do distúrbio devido ao déficit hídrico.

Dinâmica do distúrbio (dias)			Magnitude do distúrbio ( $\delta$ )		Dureza ( $\sigma_p$ )	
Início (ti)	Parar (tp)	Duração	Marandu	Convert	Marandu	Convert
30	35	5	0,574	1,000	2,87	5,00
30	40	10	0,316	1,000	3,16	10,00
80	85	5	0,301	1,000	1,51	5,00
80	90	10	0,158	1,000	1,58	10,00
80	93 <sup>1</sup>	13	0,121	0,981	1,57	12,75

<sup>1</sup> Valor extra usado para verificar a sensibilidade do cultivar Convert.

**Tabela 4** - Indicador de resiliência: Robustez dos cultivares em termos de quantidade média de matéria seca perdida nos piquetes para os cenários de duração do distúrbio devido ao déficit hídrico.

Cenários	Distúrbio ( $\sigma$ )	F(X) em A		F(X) em B		Robustez	
		Marandu	Convert	Marandu	Convert	Marandu	Convert
C1	1,0	97,3	189,8	87,1	169,7	0,098	0,050
C2	2,5	97,3	189,8	73,2	142,0	0,104	0,052
C3	2,0	163,7	306,8	134,9	259,0	0,069	0,042
C4	5,0	163,7	306,8	65,9	116,2	0,076	0,043
C5	1,0	343,7	451,6	333,1	440,5	0,095	0,090
C6	2,5	343,7	451,6	317,0	442,6	0,094	0,086
C7	2,0	337,1	448,4	316,5	428,9	0,092	0,092
C8	5,0	337,1	448,4	282,7	393,9	0,092	0,092

**Tabela 5** - Indicador de resiliência: Rapidez de recuperação dos cultivares em termos de recompor a quantidade de MS após parar o distúrbio, média dos piquetes para os cenários de duração do distúrbio devido ao déficit hídrico.

Cenários	Distúrbio ( $\sigma$ )	Tempo recuperação (tf - tp)		Perda em F(X) (A - B)		Rapidez de recuperação	
		Marandu	Convert	Marandu	Convert	Marandu	Convert
C1	1,0	45,4	34,0	10,2	20,1	0,230	0,590
C2	2,5	56,2	38,1	24,1	48,1	0,438	1,273
C3	2,0	47,5	33,1	28,8	48,0	0,627	1,468
C4	5,0	64,5	39,7	65,9	116,2	1,097	2,970
C5	1,0	14,9	13,4	10,5	11,1	0,812	0,815
C6	2,5	47,1	29,3	26,7	28,9	0,496	0,830
C7	2,0	29,2	15,6	20,6	19,5	1,142	1,351
C8	5,0	55,6	35,4	54,4	54,5	0,935	1,42

(Tabela,6) foi considerada como F(X) a produção de MS do cenário base, a ser restaurada no momento da entrada dos animais no primeiro piquete do próximo ciclo de rotação após o distúrbio, mantendo o consumo por piquete constante nos dois dias de uso, para ambos os cultivares.

Nas simulações de cada cenário de duração, as elasticidades ( $\sigma_e$ ) dos cultivares ao déficit hídrico foram estimadas considerando a magnitude do distúrbio que impossibilita ao menos um dos piquetes de voltar a ser pastejado no período de três ciclos de 28 dias de descanso que, por exemplo, ocorreria entre os

**Tabela 6** - Indicador de resiliência: elasticidade dos cultivares, distúrbio que não restaura o estoque de matéria seca nos piquetes na entrada dos animais no próximo ciclo de rotação para os cenários de duração do déficit hídrico.

Cenários	Entrada (dias)	Saída (dias)	Magnitude do distúrbio		Elasticidade	
			Marandu	Convert	Marandu	Convert
C1 e C2	30	35	0,516	1,000	2,580	5,000
C3 e C4	30	40	0,280	0,980	2,800	9,800
C5 e C6	80	85	0,096	0,288	0,480	1,440
C7 e C8	80	90	0,043	0,117	0,430	1,170

meses chuvosos de novembro a maio. Ou, em outras palavras, a magnitude do distúrbio em que o consumo de matéria seca seria menor do que o consumido no cenário base, no período programado.

### DISCUSSÃO

O Modelo MEPA (Figura 2) apresentou flexibilidade modular para incorporar novos submodelos e variáveis necessárias a experimentação *in silico*, tal como os parâmetros para cálculo dos indicadores dinâmicos de resiliência, com base em curvas de crescimento das forrageiras validadas com dados experimentais a campo e sob pastejo (DEMSKI ET AL., 2011).

Os cenários usados (Tabela 2) para estimar a resiliência dos cultivares aos distúrbios causados pelo veranico são típicos de muitas regiões do Brasil com variação na duração de 5 a 10 dias. Por exemplo, ROLDÃO (2015) cita que entre 1990 e 2012 ocorreram 3553 veranicos na Região do Triângulo Mineiro - MG e que 77% deles tiveram duração entre 5 a 9 dias.

Na análise da dinâmica das forrageiras nos piquetes em termos de estoques de matéria seca ofertada e consumida o Convert foi mais resiliente do que o Marandu, provavelmente, conforme (DEMSKI ET AL., 2011), por apresentar maior taxa de crescimento ao longo do tempo. Ensaio a campo sob déficit hídrico são necessários para gerar recomendações práticas. O presente trabalho pode auxiliar no planejamento experimental, estabelecendo a severidade do déficit, época de ocorrência do distúrbio e escolha das variáveis respostas com maior interesse zootécnico. Com poucos esforços, novos experimentos *in silico* estocásticos poderão contribuir para cálculo do número de repetições necessário para alcançar o poder de teste desejado nos ensaios. A flutuação observada na produção de MS ao

longo do tempo nos diferentes piquetes para o cenário C8, principalmente para o Marandu, é contra intuitiva e deve ser considerada no planejamento de pastoreio rotativo com dias fixos. A dinâmica dos distúrbios do veranico na produção de MS por piquete devido a presença de retroalimentações, delays e não-linearidade das variáveis, não é percebida em situações práticas. Pois, por exemplo, dada uma determinada intensidade de déficit hídrico, qual seria a resposta no acúmulo de MS em cada piquete, os quais estão em diferentes estágios de crescimento (cenário C8)? Que decisões de modificação no pastoreio rotativo serão necessárias para atender os critérios zootécnicos? Não se encontra na literatura trabalhos experimentais a campo sobre estas questões devido (a) este problema ainda não ser visualizado na prática e (b) devido à dificuldade de estabelecer tratamentos experimentais com diferentes intensidades de veranico. Os resultados do modelo indicam que maior resiliência está associada a maior taxa de crescimento do cultivar, esta informação deve ser validada em condições a campo.

Os indicadores proposto por HERRERA (2017) apresentaram diferentes sensibilidades as mudanças ocorridas nas variáveis usadas como função de resposta do sistema aos distúrbios causados pelo déficit hídrico. Isto é compreensível devido a complexidade do problema, sugerindo que um único índice é insuficiente para operacionalizar a resiliência das forrageiras aos distúrbios climáticos.

A dureza dos cultivares (Tabela 3), em termos de matéria seca consumida em decorrência do déficit hídrico, indicada pela menor magnitude para cada duração do distúrbio, mostra que o cultivar Convert foi de 1,7 a 6,3 vezes mais resiliente do que o cultivar Marandu, podendo suportar veranicos mais intensos sem comprometer o consumo dos

animais no período de uso dos piquetes. Isto se explica pela maior taxa de crescimento do Convert em nível tal que a diminuição do crescimento da matéria seca no período de duração do distúrbio não afeta a função de pastejo dos piquetes.

A robustez estimada em função da perda de matéria seca durante o distúrbio mostra que o Marandu foi mais resiliente do que o Convert na fase de crescimento das forrageiras, mas se igualam nos cenários mais severos (C7 e C8). Portanto, para uma mesma intensidade de distúrbio devido ao veranico o Marandu perdeu, em média, menos matéria seca por piquete do que o Convert. De fato, nos cenários C1 e C2 a perda média de MS ao final do distúrbio para o Marandu foi de 17,5 kg por piquete e para o Convert foi de 33,0 kg por piquete em relação ao cenário base.

O índice de rapidez de recuperação foi estimado considerando o tempo após o distúrbio necessário para que a MS dos piquetes retorne ao patamar que seria alcançado sem o distúrbio. A rapidez de recuperação é um fator de extrema importância no manejo de pastoreio rotativo, devido a premência de tempo na definição da entrada e saída dos animais nos piquetes. Portanto, o cultivar de forrageira com maior resiliência apresenta recuperação mais rápida. Neste aspecto o Convert foi mais resiliente do que o Marandu em todos os cenários de distúrbios, principalmente na fase de crescimento (cenários C1 a C4) o acúmulo de MS do Convert foi em média 2,6 vezes mais rápido o que implicou em recuperação em 36 dias enquanto o Marandu demorou 53 dias para o estoque de MS igualar ao cenário base. Isto é contra intuitivo se considerar que o Convert perdeu mais MS durante o distúrbio e teve menor robustez.

A elasticidade do Marandu indica sua baixa capacidade de resistir ao distúrbio devido o veranico brando ou severo sem alterar a estabilidade do pastoreio rotativo. A alta elasticidade do Convert indica maior resiliência, principalmente na fase inicial do crescimento da forrageira. Mas na fase de uso também apresenta baixa capacidade de resistir ao efeito do veranico, necessitando de práticas extras para estabilizar o pastoreio rotativo dos animais no próximo ciclo de rotação.

Os resultados dos experimentos *in silico*

mostraram diferenças entre os dois grupos de cenários (fase de crescimento da forrageira e fase de uso) em termos de resiliências dos cultivares aos distúrbios do déficit hídrico.

Em termos práticos, o manejo dos piquetes é flexível, mesmo considerando o ciclo fixo de rotação, podendo escolher o piquete com melhores condições para pastejo. Além disso, é usual nas propriedades manter outras áreas de pastagem como áreas de reserva ou escape. Nestas simulações, optou-se por não ajustar o procedimento rotativo dos piquetes para poder realçar os efeitos do distúrbio de déficit hídrico, supondo que todos os valores dos demais fatores permaneceram constantes.

Adotando o princípio da precaução no âmbito da modelagem, alerta-se que resultados das simulações (experimentos *in silico*) geram conhecimentos sobre a resiliência que são úteis para planejar experimentos e elaborar hipóteses a serem testadas em condições de campo, portanto, não geram evidências que suportam orientações técnicas para recomendação de cultivares.

## CONCLUSÕES

O método de modelagem da dinâmica de sistemas usado para a operacionalização da resiliência permitiu analisar a dinâmica das respostas em oferta e consumo de forrageiras em pastoreio rotativo de bovinos leiteiros aos distúrbios de eventos de déficit hídrico.

Nas curvas simuladas de estoque de matéria seca nos piquetes foram observadas diferenças nos índices de resiliência entre os cultivares e diferenças na resiliência em função do período de ocorrência do déficit hídrico.

Os índices de resiliência geram informações contra intuitivas sobre o comportamento dinâmico do estoque de matéria seca nos piquetes, que auxiliam o planejamento do pastoreio rotativo. Mas para a recomendação de cultivares são necessários ensaios a campo com a avaliação da resiliência ao déficit hídrico.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- AMBRÓSIO, L.A.; CAMPOS, F.P.; SARMENTO, P. Modelagem de ecossistema planta-animal na produção de leite. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 45., 2008, Lavras. **Anais...** Lavras, MG: SBZ, 2008.
- CARPENTER, S.; WALKER, B.; ANDERIES, J.M.; ABEL, N. From metaphor to measurement: Resilience of what to what? **Ecosystems**, v.4, p.765-781, 2001. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9>
- CARVALHO, J.R.P.; ASSAD, E.D.; EVANGELISTA, S.R.M.; PINTO, H.S. Estimation of dry spells in three Brazilian regions - Analysis of extremes. **Atmospheric Research**, v.132, p.12-21, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.04.003>
- DEGOLA, T.; DOMINGUES, L.; CAMARGO, R. Veranicos no Estado de São Paulo: detecção e identificação das condições meteorológicas associadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 18., 2011, Guarapari. **Anais...** Guarapari, ES: SESC Centro de Turismo de Guarapari, 2011. < <http://www.sbagro.org.br/bibliotecavirtual/arquivos/3656.pdf>> Acesso em: 20 Ago. 2018.
- DEMSKI, J.B.; AMBROSIO, L.A.; ARCARO JUNIOR, I.; GIMENES, F. M. A.; TOLEDO, L. M.; SILVA, G. A. Vacas em lactação sob pastejo rotacionado em piquetes com Marandu e Convert: Modelo MEPA. In: ENCONTRO CIENTIFICO DE PRODUÇÃO ANIMAL SUSTENTÁVEL, 2., 2011, Nova Odessa-SP. **Anais...** Nova Odessa, SP: Instituto de Zootecnia, 2011. p.1-3.
- GUNDERSON, L.H. Ecological resilience in theory and application. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v.31, p.425-439, 2000. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.31.1.425>
- HERRERA, H. From Metaphor to Practice: Operationalizing the Analysis of Resilience Using System Dynamics Modelling. **Systems Research and Behavioral Science**, v.34, p.444-462, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/sres.2468>
- IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007. 104 p.
- IPCC. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- LACERDA, F.F.; DIAS, H.; ASSAD, E.D.; SANTOS, A.A.; SILVA, A.A.G. Detecção de sinais de mudanças climáticas para algumas localidades do Sertão do Pajeú - PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, MG: Sbagro, 2009. Disponível em: < <http://www.sbagro.org.br/bibliotecavirtual/arquivos/2397.pdf>> Acesso em: 20 ago. 2018.
- MAHLMEISTER, K.; MARCONATO, M.H.; LEMES, A.P.; ESTEVES, S.N. PEZZOPANE, J.R.M.; OLIVEIRA, P.P.A.; PEDROSO, A.F.; ALVES, T.C.; BERNARDI, A.C.C. **Efeito do veranico da safra 2013/2014 sobre produção de forragem e lotação animal em sistemas agropecuários integrados**. São Carlos: Embrapa Instrumentação: Embrapa Pecuária Sudeste, 2014. 102 p. (Documentos, 57)
- MINUZZI, R.B.; CARAMORI, P.H. Variabilidade climática sazonal e anual da chuva e veranicos no Estado do Paraná. **Ceres**, vol.58, p.593-602, 2011. <https://doi.org/10.1590/s0034-737x2011000500009>
- ROLDÃO, A.F.; FERREIRA, V.O. Influência do fenômeno veranico na produtividade da soja na mesorregião Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, MG. **Estudos Geográficos (UNESP)**, v. 13, p. 118-138, 2015.
- SILVA, P.M.P.; CHIARI, L.; JANK, L.; ARAUJO, A.R.; EUCLIDES, V.P.B. Avaliação de cultivares de Panicum maximum Jacq. submetidas ao déficit hídrico. In: I WORKSHOP SOBRE ESTRESSES ABIÓTICOS, 1., 2013, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Embrapa, 2013. v. 1. p. 01-104.

STERMAN, J.D. **Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World**. Chicago, IL.: McGraw Hill Companies, 2000. 982p.

TODMAN, L.C.; FRASER F.C.; CORSTANJE, R.; DEEKS, L.K.; HARRIS, J.A.; PAWLETT, M.; RITZ, K.; WHITMORE, A.P. Defining and quantifying the resilience of responses to disturbance: a conceptual and modelling approach from soil science. **Scientific Reports** v.6, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep28426>

VANCLAY, J.C. The One-minute Modeller: An Introduction to Simile. **Annals of Tropical Research**, v.25, p.31-44, 2003.

VOISIN, A. **Grass Productivity**. Covelo, CA: Island Press, 1988. 353p.

WILBANKS, T.J. Inducing transformational energy technological change. **Energy Economics**, v.33, n.4, p.699-708, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2010.12.019>