



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ZOOTECNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

SAMUEL ROCHA MARANHÃO

**MODELAGEM DE SISTEMAS APLICADA À PRODUÇÃO DE FORRAGEM E AO
USO DA ÁGUA, NAS CONDIÇÕES ATUAIS E SOB MUDANÇAS CLIMÁTICAS, NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

FORTALEZA

2021

SAMUEL ROCHA MARANHÃO

MODELAGEM DE SISTEMAS APLICADA À PRODUÇÃO DE FORRAGEM E AO USO
DA ÁGUA, NAS CONDIÇÕES ATUAIS E SOB MUDANÇAS CLIMÁTICAS, NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Zootecnia.
Área de concentração: Forragicultura

Orientador: Prof. Dr. Magno José Duarte
Cândido

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Gregório da
Silva

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M26m Maranhão, Samuel Rocha.
Modelagem de sistemas aplicada à produção de forragem e ao uso da água, nas condições atuais e sob mudanças climáticas, no Semiárido Brasileiro / Samuel Rocha Maranhão. – 2021.
116 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Magno José Duarte Cândido. Coorientação: Prof. Dr. Rodrigo Gregório da Silva.
1. Análise de risco. 2. Dinâmica de sistemas. 3. Modelagem mecanicista. 4. Modelos globais. 5. Recursos hídricos. I. Título.

CDD 636.08

SAMUEL ROCHA MARANHÃO

MODELAGEM DE SISTEMAS APLICADA À PRODUÇÃO DE FORRAGEM E AO USO
DA ÁGUA, NAS CONDIÇÕES ATUAIS E SOB MUDANÇAS CLIMÁTICAS, NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tese ou Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Zootecnia da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Doutor em
Zootecnia. Área de concentração:
Forragicultura

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Magno José Duarte Cândido (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Ana Clara Rodrigues Cavalcante
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Caprinos e Ovinos)

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Gherman Garcia Leal de Araújo
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido)

Prof. Dr. Valdson José da Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Aos meus pais, Neto e Conceição, pelo incentivo a seguir em busca do conhecimento, com o apoio incondicional em todos os momentos. Obrigado por tudo!

À minha companheira de vida, de lutas e de sonhos, Leda, e aos nossos pequenos tesouros, Ana Laysa e Ana Helen.

Com carinho, dedico a vocês!

AGRADECIMENTOS

Ao Deus de toda criação, pela vida, saúde e disposição a mim concedida para enfrentar os desafios de cada dia.

À Universidade Federal do Ceará, pela calorosa acolhida, e ao Programa de Doutorado Integrado em Zootecnia - PDIZ/UFC/UFPB, pela oportunidade de realização do doutorado.

Ao meu orientador, com imenso apreço, Professor Dr. Magno José Duarte Cândido, pela paciência e compreensão nos momentos difíceis, amizade e pelos contínuos ensinamentos da Forragicultura e da vida. Além de tudo, exemplo de orientador e cientista. Muito obrigado.

Ao meu coorientador, com grande estima, Dr. Rodrigo Gregório da Silva, por todo o apoio e ensinamentos durante a pesquisa e fora dela, sobretudo pela nova visão e entendimento dos sistemas pecuários a mim apresentados. Grande cientista das terras secas. Muito obrigado.

Ao Dr. Jay Peter Angerer, pelos imprescindíveis e valiosos conhecimentos acerca da modelagem, os quais foram fundamentais para a minha formação e conclusão deste trabalho.

Aos amigos do projeto de modelagem de ecossistemas pastoris semiáridos pelos encontros e discussões de alto valor científico, as quais foram a base para a formação do pensamento.

Aos membros da banca examinadora, Dra. Ana Clara Rodrigues Cavalcante, Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa, Dr. Gherman Garcia Leal de Araújo e Dr. Valdson José da Silva, pelas brilhantes e imprescindíveis contribuições para a melhoria deste trabalho, além da disponibilidade e despreziosa amizade durante esta caminhada.

À Secretária da Pós-Graduação, em nome de Francisca, sempre disponível e com grande gentileza em resolver os assuntos pertinentes ao programa de pós-graduação.

Ao corpo docente do Programa de Doutorado Integrado em Zootecnia - PDIZ/UFC/UFPB, pela valiosa contribuição para minha formação profissional e pessoal.

Ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Limoeiro do Norte, pela estrutura física e pessoal para a condução dos trabalhos de campo.

Ao NEEF, pela oportunidade de aprendizado e boas amizades formadas.

Aos colegas da turma de Doutorado 2017.1, pelos momentos difíceis e felizes vividos durante esse período de nossa formação profissional.

Aos amigos, Arnon Conrado, Clésio Santos, Leonardo Fiúsa, Rafael Furtado, Marcos Neves, Diego Amorim, Ricardo Araújo, Vitor Maués e Thayson Duarte pela amizade e engrandecimento pessoal, tornando esta etapa mais grandiosa.

Ao amigo Clemente Fernandes, em especial, pela valiosa e sincera amizade, companheirismo, ensinamentos e ajuda, nas incontáveis horas de viagens, estudos e de trabalho ao sol do Semiárido!

Aos colegas e colaboradores do IFCE, Cléber Medeiros, Arilene Franklim, Harlam, Pedro Muniz, Caíque, Henrique Maia (in memoriam), Danilo, Dênis, Seu Vadir, “Dedé novo”, Dedé velho”, “Tiquim”, “Pequeno”, entre tantos outros que, despretensiosamente, nos ajudaram e nos fizeram companhia nos dias e nas noites da Chapada do Apodi.

Enfim, a todos que colaboram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

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

²⁵Deus revelou ao faraó o que ele está para fazer. ²⁶As sete vacas boas são sete anos, e as sete espigas boas são também sete anos. Sete anos de fartura. ²⁷As sete vacas magras e feias, e as sete espigas mirradas, serão sete anos de fome. ³²A questão já foi decidida por Deus. Procure agora o faraó um homem criterioso e sábio e coloque-o no comando da terra do Egito. ³⁴DEVERÁ SER RECOLHIDO UM QUINTO DA COLHEITA DO EGITO DURANTE OS SETE ANOS DE FARTURA. ³⁵Eles deverão recolher o que puderem nos anos bons que virão e fazer ESTOQUES. ³⁶Esse estoque servirá de RESERVA para os sete anos de fome que virão sobre o Egito, para que a terra não seja arrasada pela fome.

(GÊNESIS 41:25-36)

RESUMO

O trabalho foi desenvolvido utilizando técnicas de modelagem mecanicista/estocástica e de dinâmica de sistemas para o entendimento dos fluxos e gestão da água e forragem em sistemas de produção animal no Semiárido, também sob a perspectiva das mudanças climáticas. O estudo foi dividido em: (1) uso da modelagem para estimativas de estoques e ofertas de forragem em unidades pecuárias do Semiárido, (2) estimativa da capacidade de suporte do capim-buffel e capim-corrente sob o cenário de mudanças climáticas, e (3) modelagem do balanço hídrico de um sistema de produção de ruminantes no Semiárido. No primeiro estudo, foi pretendida a reestruturação do Sistema de Garantia de Forragem Estabilizada e a apresentação da metodologia: sistema de gestão da produção de biomassa garantida para o Semiárido Brasileiro “Sistema Asa Branca”. Para aplicação da técnica, foram utilizados modelos de simulação (PHYGROW) dos capins buffel e massai e palma forrageira, realizados testes de aderência e geração de séries sintéticas utilizando o *software* @RISK[®]. Os modelos, primeiramente obtidos para Limoeiro do Norte-CE, foram derivados para uma propriedade locada em Quixeramobim-CE. Foram estipulados diferentes modelos de uso das áreas e analisados pelo conceito de garantia. Verificou-se que, à medida que a palma forrageira é inserida em maiores proporções na propriedade, menor é a variação da produção total do sistema, agindo com um elemento tamponante da oscilação natural da oferta de forragem da pastagem nativa. Com a garantia de 95%, o modelo intermediário de inclusão da palma forrageira (Modelo 03) mostra um potencial de incremento de aproximadamente 293.000 kg de MS na propriedade. No segundo estudo, foram realizadas simulações utilizando o PHYGROW para avaliar os possíveis impactos futuros das mudanças climáticas na capacidade de suporte do capim-buffel e capim-corrente, por meio dos modelos climáticos globais CNRM-CM3, MIROC5 e MRI-CGCM3, considerando o cenário RCP 4.5. Foi considerado o intervalo futuro de 38 anos para a região da Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE. Verificou-se adequada correlação entre os modelos climáticos e o modelo inicial de crescimento das culturas pelo PHYGROW. Os cenários apresentados para as duas forrageiras avaliadas são positivos, indicando uma capacidade de suporte estimada em 1,5 a 2,5 UA ha⁻¹ e estabilizada ao longo do período simulado. No terceiro estudo, objetivou-se demonstrar o impacto do consumo de água de um sistema de produção de ruminantes na pequena açudagem. O modelo de uso da água foi elaborado no *software* Vensim PLE[™] para uma propriedade hipotética locada em Petrolina-PE. A capacidade do reservatório e as taxas de evaporação, de infiltração e de escoamento foram estimadas da literatura e a precipitação

pluviométrica foi estimada por função densidade de probabilidade no *software @RISK*[®]. Foram estimados o uso de irrigação, o consumo de água da propriedade familiar e o consumo de água por caprinos, ovinos e bovinos. No horizonte de 30 anos, em apenas cinco destes foi atingida a máxima capacidade do reservatório. Nos cenários com maior demanda por água são verificados anos onde o açude seca completamente, inviabilizando a produção animal. Por meio do modelo proposto, foi possível estimar, utilizando indicadores práticos e reais, combinações para encontrar a melhor forma de uso da água, a depender do tipo de rebanho e do uso de irrigação.

Palavras-chave: Análise de risco. Dinâmica de sistemas. Modelagem mecanicista. Modelos globais. Recursos hídricos.

ABSTRACT

The study was performed using techniques of mechanistic / stochastic modeling and Systems Dynamics to understand the flows and management of water and forage in animal production systems in the semi-arid, also from the perspective of climate change. The study was divided into: (1) use of modeling to estimate stocks and forage on offer in livestock units in the semi-arid, (2) estimate of the buffel and current grass supporting capacity under the climate change scenario and (3) modeling of the water balance of a ruminant production system in the semi-arid region. In the first study, it was intended to restructure the Stabilized Forage Guarantee System and to present the methodology: guaranteed biomass production management system for the Brazilian Semi-arid "Asa Branca System. For application of the technique, simulation models using PHYGROW program of buffel and massai grasses and cactus pear were used, adhesion tests and generation of synthetic series at @RISK[®] software were performed. The models, first obtained for Limoeiro do Norte-CE, were derived for a property leased in Quixeramobim-CE. Different models of use of the areas were stipulated and analyzed by the guarantee concept. It was verified that, as the cactus pear is inserted in greater proportions in the property, the variation of the total production of the system is smaller, acting with a buffering element of the natural oscillation of the forage supply of the native pasture. With a 95% guarantee, the intermediate model of inclusion of cactus pear (Model 03) shows an increase potential of approximately 293,000 kg of DM in the property. In the second study, simulations using PHYGROW were carried out to assess the possible future impacts of climate change on the carrying capacity of buffel grass and current grass, using the global climate models CNRM-CM3, MIROC5 and MRI-CGCM3, considering the scenario RCP 4.5. The future interval of 38 years was considered for the Apodi plateau region, Limoeiro do Norte-CE. There was an adequate correlation between the climatic models and the initial model of crop growth by PHYGROW. The scenarios presented for the two forages evaluated are positive, indicating a support capacity estimated at 1.5 to 2.5 AU ha⁻¹ and stabilized over the simulated period. In the third study, the objective was to demonstrate the impact of water consumption from a ruminant production system in a small reservoir. The water use model was developed using the Vensim PLE[™] software for a hypothetical property located in Petrolina, Pernambuco, Brazil. The reservoir capacity and evaporation, infiltration and runoff rates were estimated from the literature and rainfall was estimated using the probability density function in the @RISK[®] software. The use of irrigation, water consumption of the family property, and water consumption by goats, sheep and cattle were estimated in the

literature. In the horizon of 30 years, in only five of these the maximum capacity of the reservoir was reached. In the most demanding water scenarios, years are observed where the weir dries completely, making animal production unfeasible. Using the proposed model, it was possible to estimate, using practical and real indicators, combinations to find the best way to use water, depending on the type of herd and the use of irrigation.

Keywords: Global models. Mechanistic modeling. Risk analysis. Systems dynamics. Water resources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE) do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), na Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE	30
Figura 2	– Precipitação pluviométrica (mm) verificada em estação meteorológica presente na área experimental nos anos de 2016, 2017, 2018 e 2019 na Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE	30
Figura 3	– Plantio do capins buffel e massai em linhas de 0,30 cm (esquerda) e detalhe para o ponto de colheita de biomassa do capim-buffel (direita).....	31
Figura 4	– Espaçamento de 1,5 metros entre linhas de cultivo (esquerda) e detalhe para a permanência do cladódio basal no momento do corte da palma forrageira(direita).....	32
Figura 5	– Banco de dados de solos do <i>software</i> PHYGROW disponível na plataforma Google Earth.....	36
Figura 6	– Coleta de amostras de solo indeformada	38
Figura 7	– Pesagem da amostra de solo indeformada e seca em estufa a 105° C (esquerda) e detalhe para as frações de solo maiores que dois milímetros (direita).....	38
Figura 8	– Diagrama do Sistema de Garantia de Forragem Estabilizada	40
Figura 9	– Localização espacial da Fazenda Remédio e distribuição das classes de solos no município de Quixeramobim-CE.....	41
Figura 10	– Predição da biomassa de forragem total (kg de matéria seca ha ⁻¹) do capim-buffel, capim-massai e palma forrageira na Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE, pelo modelo PHYGROW.....	45
Figura 11	– Ajuste da função tipo <i>Weibull</i> para o comportamento do histórico (estimado no PHYGROW) da produção de biomassa anual para o capim-buffel, capim-massai e palma forrageira na Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE	48

Figura 12 – Garantias naturais de produção de biomassa para o capim-buffel (a), capim-massai (b) e palma forrageira (c) na Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE	51
Figura 13 – Série histórica da produtividade do capim-buffel (a), capim-massai (b) e palma forrageira (c) estimada (PHYGROW) para Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE e séries históricas derivadas dos modelos supracitados para a Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE	54
Figura 14 – Ajuste da função tipo <i>Weibull</i> para o crescimento da pastagem natural (derivado do modelo de crescimento em Sobral, Ceará (MORAES, 2021)), do capim-buffel, capim-massai e palma forrageira (derivado do modelo de crescimento em Limoeiro do Norte-CE) para a Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE	55
Figura 15 – Biomassa de forragem total (BFT), biomassa de forragem total – eficiência do uso da forragem (BFT-EUF) e coeficiente de variação (%) dos recursos forrageiros simulados para a Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE	58
Figura 16 – Biomassa de forragem para os diferentes modelos de uso e ocupação da Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE, considerando a eficiência do uso da forragem (EUF): Pasto natural (50%), Capim-buffel (60%), Massai (70%), Palma (90%)	59
Figura 17 – Biomassa de forragem e coeficiente de variação dos modelos de uso e ocupação da propriedade, simulados para a fazenda Remédio, Quixeramobim-CE	59
Figura 18 – Garantias naturais de produção de biomassa da pastagem natural (derivado do modelo de crescimento em Sobral, Ceará (MORAES, 2021)), do capim-buffel, capim-massai e palma forrageira (derivado do modelo de crescimento em Limoeiro do Norte-CE) para a Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE	61
Figura 19 – Reestruturação do Sistema de Garantia de Forragem Estabilizada	63
Figura 20 – Biomassa de forragem total incrementada (Modelo 03) e da pastagem natural (esquerda) e taxas de lotação incrementada (Modelo 03) e da pastagem natural (direita) simuladas para a Fazenda Remédio,	64

Quixeramobim-CE	
Figura 21 – Garantias (95%) da pastagem natural (coluna esquerda), da pastagem natural regularizada (coluna central) e biomassa de forragem total (BFT) das culturas (Modelo 03) (coluna direita), aplicada a Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE	65
Figura 22 – Análise de frequência e regressão dos modelos PHYGROW (série sintética pregressa) e modelos climáticos CNRM-CM5, MIROC5 e MRI-CGCM3 (projeções futuras) para o capim-buffel no município de Limoeiro do Norte-CE, conforme o cenário RCP 4.5	77
Figura 23 – Análise de frequência e regressão dos modelos PHYGROW (série sintética pregressa) e modelos climáticos CNRM-CM5, MIROC5 e MRI-CGCM3 (projeções futuras) para o capim-corrente no município de Limoeiro do Norte-CE, conforme o cenário RCP 4.5	78
Figura 24 – Capacidade de suporte (UA ha ⁻¹) estimada pelos modelos PHYGROW (série sintética pregressa) e modelos climáticos CNRM-CM5, MIROC5 e MRI-CGCM3 (projeções futuras de 38 anos) para o capim-buffel no município de Limoeiro do Norte- Ce, conforme o cenário RCP 4.5	79
Figura 25 – Capacidade de suporte (UA ha ⁻¹) estimada pelos modelos PHYGROW (série sintética pregressa) e modelos climáticos CNRM-CM5, MIROC5 e MRI-CGCM3 (projeções futuras de 38 anos) para o capim-corrente no município de Limoeiro do Norte-CE, conforme o cenário RCP 4.5	80
Figura 26 – Exemplo de modelo desenvolvido no <i>software</i> Vensim PLE™.....	87
Figura 27 – Diagrama do fluxo de água de um sistema de produção pecuário hipotético em ambiente Semiárido. As setas em azul e vermelho representam entradas e saídas da água do sistema, respectivamente	88
Figura 28 – Histórico de precipitação do município de Petrolina-PE	89
Figura 29 – Ajuste da função tipo <i>Weibull</i> para o comportamento da precipitação em Petrolina-PE	89
Figura 30 – Simulação da precipitação (função <i>Weibull</i>) para o município de Petrolina-PE considerando um cenário de 30 anos	90

Figura 31 – Possíveis entradas e saídas que influenciam no consumo de água no submodelo animal	92
Figura 32 – Taxas de recarga do reservatório (m ³), escoamento superficial (m ³), evaporação (m ³), infiltração (m ³), sangria (m ³) e precipitação (mm) estimadas para uma microbacia hidrográfica hipotética no município de Petrolina-PE	95
Figura 33 – Cenários e consumo de água por seis diferentes sistemas de produção de caprinos e ovinos para o município de Petrolina-PE	96
Figura 34 – Simulações do uso da água do reservatório por quatro diferentes sistemas de produção de caprinos e ovinos para o município de Petrolina-PE	97
Figura 35 – Cenários e consumo de água por seis diferentes sistemas de produção de bovinos para o município de Petrolina-PE	99
Figura 36 – Simulações do uso da água do reservatório por quatro diferentes sistemas de produção de bovinos para o município de Petrolina-PE	100
Figura 37 – Série histórica da produtividade do capim-buffel estimada pelo <i>software</i> PHYGROW para o município de Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil	112
Figura 38 – Série histórica da produtividade do capim-corrente estimada pelo <i>software</i> PHYGROW para o município de Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil	112
Figura 39 – Simulação do impacto das mudanças climáticas na produtividade do capim-buffel em Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil, por três modelos climáticos globais, conforme o cenário RCP 4.5	113
Figura 40 – Simulação do impacto das mudanças climáticas na produtividade do capim-corrente em Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil, por três modelos climáticos globais, conforme o cenário RCP 4.5	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros para a primeira modelagem da planta no sítio ecológico	33
Tabela 2 – Parâmetros básicos da planta no <i>software</i> PHYGROW	34
Tabela 3 – Parâmetros avançados da planta no <i>software</i> PHYGROW	34
Tabela 4 – Parâmetros do solo no <i>software</i> PHYGROW	37
Tabela 5 – Zoneamento da propriedade conforme as áreas de reserva legal e proteção permanente e das classes de solo e suas potenciais aptidões	42
Tabela 6 – Estatística para avaliação da capacidade do modelo PHYGROW de simular o crescimento vegetal do capim-buffel, capim-massai e palma forrageira, em Limoeiro do Norte-CE	45
Tabela 7 – Séries sintéticas de dados de produção de biomassa do capim-buffel, capim-massai e palma forrageira, geradas por números pseudo-aleatórios, com base na função <i>Weibull</i>	50
Tabela 8 – Estatística para avaliação da capacidade do modelo PHYGROW de simular o crescimento vegetal do capim-buffel e capim-corrente em Limoeiro do Norte-CE	73
Tabela 9 – Modelos de circulação globais oceânicos-atmosféricos (MGCOA), componentes auxiliares do IPCC	74
Tabela 10 – Correlação entre os modelos climáticos CNRM-CM5, MIROC5 e MRI-CGCM (projeções futuras) e o modelo PHYGROW (série sintética pregressa) para a estimativa de crescimento vegetal do capim-buffel e capim-corrente em Limoeiro do Norte-CE	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	20
2	CAPÍTULO I: USO DA MODELAGEM PARA ESTIMATIVAS DE ESTOQUES E OFERTAS DE FORRAGEM EM UNIDADES PECUÁRIAS DO SEMIÁRIDO	26
2.1	Introdução	28
2.2	Material e métodos	29
2.2.1	<i>Etapa 1: Colheita de dados de campo</i>	29
2.2.2	<i>Etapa 2: Parametrização, calibração e validação do modelo PHYGROW</i>	32
2.2.3	<i>Etapa 3: o método de Monte Carlo</i>	39
2.2.4	<i>Etapa 4: o conceito de garantia</i>	39
2.2.5	<i>Aplicação do conceito de garantia à unidade de produção</i>	41
2.3	Resultados e discussão	44
2.3.1	<i>Performance do modelo de simulação PHYGROW</i>	44
2.3.2	<i>Função densidade de probabilidade e garantias naturais de produtividades das culturas</i>	47
2.3.3	<i>O Sistema Asa Branca aplicado à unidade de produção</i>	53
2.4	Conclusão	66
3	CAPÍTULO II: ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE SUPORTE DO CAPIM-BUFFEL E CAPIM-CORRENTE SOB O CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	70
3.1	Introdução	72
3.2	Material e métodos	73
3.3	Resultados e discussão	75
3.4	Conclusão	81
4	CAPÍTULO III: MODELAGEM DO BALANÇO HÍDRICO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE RUMINANTES NO SEMIÁRIDO	84
4.1	Introdução	86
4.2	Material e métodos	87
4.2.1	<i>Modelo de uso/fluxo de água em sistemas de produção animal no Semiárido brasileiro</i>	87
4.2.2	<i>Construção do modelo</i>	87

4.2.3	<i>Cenários de consumo de água por caprinos, ovinos e bovinos</i>	93
4.3	Resultados e discussão	94
4.3.1	<i>Simulação I - Estimativa do volume máximo do reservatório</i>	94
4.3.2	<i>Simulação II - Consumo de água em diferentes cenários de produção de caprinos e ovinos em ambiente semiárido</i>	95
4.3.3	<i>Simulação III - Consumo de água em diferentes cenários de produção de bovinos em ambiente Semiárido</i>	98
4.4	Conclusão	102
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICE A – SÉRIES SINTÉTICAS DA PRODUTIVIDADE E IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DOS CAPINS BUFFEL E CORRENTE	112
	ANEXO A – MEMÓRIA DE CÁLCULO DOS COMPONENTES DO “DIAGRAMA DO FLUXO DE ÁGUA DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO PECUÁRIO EM AMBIENTE SEMIÁRIDO”	114

1 INTRODUÇÃO GERAL

Nas últimas décadas, o setor agropecuário foi impactado com o aumento do acesso a tecnologias e informações, o que levou a uma melhor organização da atividade, produzindo de forma mais eficiente, com maior lucratividade e cuidado ambiental. Tal advento foi possível graças ao treinamento de pessoal nas universidades e nos centros de pesquisa, buscando soluções para melhor entender os problemas dos sistemas de produção.

Em se tratando dos sistemas de produção animal no Semiárido, estes são por natureza uma atividade de risco. As variações do clima, sobretudo do comportamento incerto das chuvas sobre a produção vegetal, afetam os seus resultados, de modo que há tempos se tem despendido esforços para mitigar tais efeitos, como o uso de tecnologias de armazenamento de alimentos, de planejamento e gestão da propriedade (SILVA et al., 2013).

Para gerir uma propriedade rural no Semiárido, onde a principal entrada do sistema (precipitação pluviométrica) apresenta caráter incerto (SOARES NETO et al., 2013), faz-se necessário compreendê-la, não a tratando como uma variável estatística, mas sim como uma variável de natureza probabilística. Nesse sentido, uma vez que há a possibilidade de entender o comportamento da chuva, não se tratando de volume, mas como esta influencia a produção vegetal, o sistema passa a ser planejado de maneira calculada.

Dada as particularidades das propriedades situadas no Semiárido brasileiro, envoltas por razões culturais e, sobretudo pelas características edafoclimáticas, da vegetação nativa e do acesso à água, o potencial de produção de alimentos é singular e qualquer abordagem generalista trará erros na gestão dos recursos. As características do solo e relevo do Semiárido brasileiro determinam o tipo de Caatinga e com ela dois pontos cruciais da oferta de forragem para os rebanhos: (1) a natural heterogeneidade de espécies com e sem potencial forrageiro e (2) a oscilação desta em razão do regime de chuvas. Assim, essas duas problemáticas são um dos grandes entraves da pecuária praticada nos domínios da Caatinga, potencializadas pela característica única de cada propriedade, com a produção de biomassa variando ao longo do tempo.

A natureza já nos tem mostrado, a exemplo das “criaturas que vivem em sociedade”, que a maneira de sobreviver em ambientes onde há uma natural flutuação e sazonalidade na oferta de alimento, é por meio do acúmulo dos excedentes sob a forma de estoque. Trazendo esta ideia para a propriedade, a questão que fica é: em função do potencial de produção de biomassa da fazenda, o que produzir e o quanto que deveria ser estocado para que a

propriedade mantenha a oferta regular de alimentos para os animais, mesmo para aqueles piores cenários climáticos.

Quando é pretendido incrementar a produção de forragem, o zoneamento dos solos da propriedade pode ser elencado como um dos fundamentos para essa prática, logo que permite identificar as classes de solos e suas potenciais aptidões, elevando a eficiência e a produção de biomassa pela escolha das espécies mais adaptadas a cada tipo de solo. Dessa maneira, pela inserção de um componente em que pelo menos é de integral valor forrageiro, já é permitido melhorar a estimativa da capacidade de suporte animal da propriedade.

Todavia, algumas questões sobrepõem os domínios da propriedade rural, como: a problemática da mudança climática e a incerteza desta na produtividade das culturas a médio e longo prazo; tamanho cada vez menor das propriedades; forte oscilação dos preços de produtos e insumos e recursos naturais. Nesse contexto, enxergar todas essas interações é tarefa quase impossível de ser realizada pelo gerenciador da propriedade, isto posto pela própria incapacidade humana de processamento de tantas informações (BERTALANFFY, 2008).

A facilidade de acesso à tecnologia computacional trouxe estímulo para a utilização de equações diferenciais para o entendimento de sistemas complexos como é o caso de uma propriedade rural. É nesse instante que a modelagem matemática permite formar uma junção dos elementos econômicos, sociais e ambientais que compõem um sistema de produção animal.

A modelagem dos sistemas agrícolas foi idealizada por pesquisadores e entusiastas de uma numerosa variedade de disciplinas, que contribuíram com conceitos e ferramentas por mais de seis décadas (JONES et al., 2017). Modelos matemáticos, resgatando a etimologia desta primeira palavra (modelo), procuram representar determinado sistema real. Consistem de equações quantitativas utilizadas na construção de um modelo, as quais são baseadas no sistema real. As equações que o compõem são função de dados conhecidos ou previstos pelo modelo real, podendo avaliar os dados conhecidos ou prever as leituras realizadas no mundo real.

Tais modelos possuem classificações e conceituações em função do tratamento dado às variáveis e suas relações. Conforme detalhado por Tucci (1998), os modelos são classificados como mecanicistas ou empíricos, quanto às relações entre as variáveis; contínuos ou discretos, como a maneira de representação dos dados; dinâmicos ou estáticos, quanto à existência temporal; pontuais ou distribuídos, quando há ou não relações no espaço; e determinísticos ou estocásticos, quando diferem quanto ao tipo de variável utilizada.

Um processo estocástico pode ser definido como uma variável que se comporta, ou pelo menos em parte, de forma randômica ao longo do tempo. Em outras palavras, descreve processos aleatórios que variam em determinado tempo. Nas ciências agrárias e nas áreas correlatas, o processo estocástico é largamente utilizado para geração de tecnologias e solução de problemas, a exemplo de seu uso na agricultura de precisão (COSSÍO, 2012; SAMPAIO et al., 2012) climatologia (CHANG et al., 2011; DURÁN PUGA et al., 2016; VIRGENS FILHO et al., 2017), ecologia da paisagem (FORTIN et al., 2003; COULON et al., 2015), engenharia florestal (AERTSEN et al., 2001; ERENOĞLU et al., 2012) hidrologia (WINTER, 2004; CIRPKA et al., 2016) e ecossistemas de pastagens (STUTH et al., 2003; JONES et al., 2017; LOPEZ-COLLADO et al., 2017).

Conforme já elencado, no Semiárido brasileiro a variação do regime de chuvas (KAYANO; ANDREOLI, 2007) vem a ser um dos principais entraves para a produção de biomassa vegetal (MOUSINHO et al., 2006) e esta característica pode ser caracterizada como um evento aleatório (SOARES NETO et al., 2013), com características probabilísticas fortemente dependentes das escalas de tempo e espaço (LETTENMAIER, 1995).

Devido à não apropriação desta informação, no sentido de não ser previsível o volume e a distribuição da precipitação mesmo ao longo da estação chuvosa, a atividade agropecuária é arriscada e com baixa perspectiva de expansão, uma vez que o planejamento, via de regra, tende a ser elaborado para curto prazo. Nesse contexto, alguns métodos estatísticos podem auxiliar no entendimento deste problema probabilístico, como o método de Monte Carlo.

O método de Monte Carlo foi formalizado em 1949 (METROPOLIS e ULAM, 1949) e pode ser retratado como um processo estatístico que sequencia números aleatórios para realizar simulações. Uma vez que o sistema a ser modelado possa ser descrito em termos de função de densidade de probabilidade, pode, portanto, ser aplicado o método. Resgatando novamente a proposição de que a precipitação é a maior influenciadora da produção de biomassa no Semiárido brasileiro, e aquela apresenta comportamento aleatório, podemos dizer que as chuvas podem ser representadas como grandezas que mudam o volume precipitado a cada evento e entre eventos. Assim, o método de Monte Carlo é um processo que pode ser aplicado de forma direta, sem necessidade de descrição das equações matemáticas que representam o comportamento do sistema, apenas que o processo possa ser descrito por funções densidades de probabilidade (YORIYAZ, 2009).

Conforme foi mencionado, assim como a chuva, o solo traz grande impacto na produção de biomassa no ambiente Semiárido e, diferente da precipitação que pode ser tratada de maneira probabilística, o solo é um fator fixo e intrínseco à propriedade, inclusive podendo

apresentar diferentes classes em seus limites. Por meio da modelagem mecanicista, a exemplo do *software* PHYGROW (*Phytomass Growth Model*) (STUTH et al., 2003) é possível estimar a produtividade das culturas em vários locais com elevada precisão, simulando de maneira hábil o crescimento vegetal nos diferentes tipos de solo, inclusive inferir a produção para outros locais por meio de modelos derivados.

Em última análise, foi pretendido visualizar a propriedade com um enfoque sistêmico, utilizando para esse fundamento a Dinâmica de Sistemas como ferramenta para envolver as técnicas de modelagem mecanicista/estocásticas apresentadas. A tentativa, portanto, foi buscar compreender o funcionamento dos sistemas, sobretudo da estimativa da produção vegetal, também sob a perspectiva das mudanças climáticas futuras, do uso da água, e as suas inter-relações, que podem contribuir significativamente no processo de planejamento e gestão de sistemas pastoris no Semiárido.

REFERÊNCIAS

- AERTSEN, Win *et al.* Evaluation of modelling techniques for forest site productivity prediction in contrasting ecoregions using stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA). **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 7, p. 929-937, 2011.
- BERTALANFFY, Ludwig von. Teoria geral dos sistemas: fundamentos, desenvolvimento e aplicações. **Petrópolis, RJ: Vozes**, v. 359, 2008.
- CHANG, Chia-C.; LIN, Shik-K.; YU, Min-T. Valuation of catastrophe equity puts with Markov-modulated Poisson processes. **Journal of Risk and Insurance**, v. 78, n. 2, p. 447-473, 2011.
- CIRPKA, Olaf A.; VALOCCHI, Albert J. Debates—Stochastic subsurface hydrology from theory to practice: Does stochastic subsurface hydrology help solving practical problems of contaminant hydrogeology?. **Water Resources Research**, v. 52, n. 12, p. 9218-9227, 2016.
- COULON, A. *et al.* A stochastic movement simulator improves estimates of landscape connectivity. **Ecology**, v. 96, n. 8, p. 2203-2213, 2015.
- VERA COSSÍO, Diego. Agriculture and rural employment agriculture in bolivia: Price controls consequences in agriculture. **Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico**, La paz, n. 17, p. 113-134, 2012.
- DURÁN PUGA, Noé *et al.* Impactos del cambio climático en la distribución potencial de *Morus alba* L. en México. **Revista mexicana de ciencias agrícolas**, v. 7, n. SPE13, p. 2511-2521, 2016.
- ERENOĞLU, R. Cüneyt. Performance of GPS Stochastic Modeling for Forest Environment. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 33, n. 2, p. 285-301, 2012.
- FORTIN, M.-J. *et al.* On the role of spatial stochastic models in understanding landscape indices in ecology. **Oikos**, v. 102, n. 1, p. 203-212, 2003.
- JONES, James W. *et al.* Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. **Agricultural systems**, v. 155, p. 269-288, 2017.
- KAYANO, Mary T.; ANDREOLI, Rita V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 27, n. 4, p. 531-540, 2007.
- LETTENMAIER, Dennis. Stochastic modeling of precipitation with applications to climate model downscaling. In: **Analysis of climate variability**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1995. p. 197-212.
- LOPEZ-COLLADO, Jose *et al.* Contribution of dung beetles to cattle productivity in the tropics: A stochastic-dynamic modeling approach. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 78-87, 2017.

METROPOLIS, Nicholas; ULAM, Stanislaw. The monte carlo method. **Journal of the American statistical association**, v. 44, n. 247, p. 335-341, 1949.

MOUSINHO, Francisco Edinaldo P. *et al.* Variabilidade espacial dos percentis 75 da precipitação pluvial anual para o Estado do Piauí. **Irriga**, v. 11, n. 2, p. 178-187, 2006.

SAMPAIO, Yony; SAMPAIO, Luciano; BARROS, Emanuel de Souza. Ajustes ambientais nos modelos DEA e a agricultura irrigada. **Economia Aplicada**, v. 16, n. 3, p. 381-397, 2012.

SILVA, Rodrigo. G. *et al.* Orçamentação Forrageira de Longo Prazo no Semiárido. **Revista Científica de Produção Animal**, v. 15, n. 2, p. 98-110, 2013.

SOARES NETO, J. P.; BEZERRA, A. R. G.; MOSCON, E. S. Probabilidade e análise decadal da precipitação pluvial da cidade de Barreiras-Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 3, p. 470-477, 2013.

STUTH, J. W. *et al.* PHYGROW users guide and technical documentation. **Department of Rangeland Ecology and Management: Texas A&M University**, 2003. 79 p.

TUCCI, C. E. M. Hydrological models. **Porto Alegre: Ed University/UFRGS/Brazilian Water Resources Association**, 1998.

VIRGENS FILHO, Jorim S. *et al.* Modelo computacional estocástico para simulações de séries climáticas diárias de umidade relativa do ar, baseado na parametrização dinâmica das distribuições de probabilidade decorrente da retroalimentação de dados. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 5, 2017.

WINTER, C. L. Stochastic hydrology: practical alternatives exist. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 18, n. 4, p. 271-273, 2004.

YORIYAZ, Hélio. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 3, n. 1, p. 141-149, 2009.

2 CAPÍTULO I: USO DA MODELAGEM PARA ESTIMATIVAS DE ESTOQUES E OFERTAS DE FORRAGEM EM UNIDADES PECUÁRIAS DO SEMIÁRIDO

RESUMO

O trabalho foi realizado com o intuito de demonstrar o potencial de incremento forrageiro e a gestão do estoque e fluxo de forragem em uma unidade de produção pecuária, por meio do uso de técnicas de modelagem mecanicista e estocástica. Para isso, foi proposta a reestruturação do modelo de capacidade de suporte ajustada das pastagens naturais, mediante acréscimo de culturas forrageiras estratégicas adaptadas ao ambiente Semiárido. Os modelos primários (calibrado/validado via PHYGROW) das culturas: capim-buffel [*Pennisetum ciliare* (L.) Link], capim-massai grass [*Megathyrsus maximus* (Jacq.) B.K. Simon & S.W.L. Jacobs] e palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], para a Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE, foram utilizados para a demonstração da metodologia: sistema de gestão da produção de biomassa garantida para o Semiárido brasileiro (Sistema Asa Branca). Para aplicação da técnica, foram criados novos modelos derivados das culturas para aplicação em uma propriedade locada em Quixeramobim-CE. As séries de dados foram submetidas a testes de aderência pelo *software* @RISK[®] e geração de séries sintéticas de dados. Foram estipulados diferentes modelos de uso das áreas com potencial de produção de forragem da propriedade e em seguida analisados pelo conceito de garantia. Verificou-se que à medida que a palma forrageira é inserida em maiores proporções na propriedade menor é a variação da produção total do sistema, agindo com um elemento tamponante da oscilação natural da oferta de forragem da pastagem nativa. Com a garantia de 95%, o modelo intermediário de inclusão da palma forrageira (Modelo 03) mostra um potencial de incremento de aproximadamente 293.000 kg de MS na propriedade, se comparado ao uso das áreas pela pastagem natural apenas. O Sistema Asa Branca apresenta ser possível elevar a capacidade de suporte da pastagem natural pelo cultivo de forrageiras adaptadas, garantidas por um sistema capaz de tamponar os anos com déficit de produção.

Palavras-chave: Análise de risco. Capacidade de suporte. Forrageiras exóticas. Modelagem mecanicista. Sistemas de produção

2 USE OF MODELING FOR STOCK ESTIMATES AND FORAGE OFFERS IN LIVESTOCK UNITS IN THE SEMI-ARID

ABSTRACT

The work was carried out in order to demonstrate the potential for forage growth and the management of forage stock and flow in a livestock production unit, through the use of mechanistic and stochastic modeling techniques. To this end, it was proposed to restructure the model of adjusted support capacity of natural pastures, by adding strategic forage crops adapted to the semi-arid environment. The primary models (calibrated / validated via PHYGROW) of the cultures: buffel grass [*Pennisetum ciliare* (L.) Link], massai grass [*Megathyrsus maximus* (Jacq.) B.K. Simon & S.W.L. Jacobs], and cactus pear [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], for Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE, were used for the demonstration of the methodology: Management system for guaranteed biomass production for the Brazilian Semiarid Region (Asa Branca System). For application of the technique, new models derived from each culture were created for application in a property located in Quixeramobim-CE. The data series were subjected to adherence tests by @RISK[®] software and generation of synthetic data series. Different models of use of the areas with potential forage production of the property were stipulated and then analyzed by the concept of guarantee. It was verified that, as the forage palm is inserted in greater proportions in the property, the variation of the total production of the system is smaller, acting with a buffering element of the natural oscillation of the forage supply of the native pasture. With a 95% guarantee, the intermediate model of inclusion of forage palm (Model 03) shows an increase potential of approximately 293,000 kg of DM in the property, when compared to the use of areas by natural pasture only. The Asa Branca System shows that it is possible to increase the support capacity of the natural pasture by cultivating adapted forages, guaranteed by a system capable of buffering the years with production deficit.

Keywords: Carrying capacity. Exotic forages. Mechanistic modeling. Production systems. Risk analysis.

2.1 Introdução

Na gestão de uma propriedade rural, assim como outra estrutura sistêmica qualquer, um dos grandes desafios é manter-se atualizado sobre tudo o que acontece em sua organização (HONKALASKAR et al., 2017). Os acontecimentos incluem a reação do sistema ao mercado (SUN et al., 2020), mudanças estratégicas e logísticas (BARBOSA et al., 2019), entre outras ações internas que ocorrem com o tempo. Na propriedade rural do Semiárido, dependente diretamente de eventos climáticos como a chuva (ANDRADE et al., 2006), torna-se mais incipiente sua perspectiva de avanço. A modelagem destes sistemas é complexa.

No contexto atual, a pecuária pode ser enquadrada como uma atividade de risco (SILVA et al., 2013), situação essa potencializada tanto quanto for maior sua dependência das chuvas como provimento para a produção de alimentos, em que os eventos aleatórios da distribuição das chuvas dentro e entre as estações (ANDRADE et al., 2006) torna a atividade agropecuária frágil e arriscada. Aliado a isso, temos ainda a diminuição da mão de obra no campo (MENEZES, 2020), do tamanho das propriedades (IBGE/SIDRA, 2019) e a complexidade inerente ao sistema de produção animal baseado em pastagens (GASPARINI et al., 2017), com todas as interações solo-planta-animal-atmosfera.

A adequada compreensão da organização de um sistema ocorre a partir do momento em que cada administrador consegue ver como tudo “funciona” ao seu redor, não somente sob sua perspectiva, mas sob a ótica dos demais envolvidos. É nesse momento que modelagem e a dinâmica de sistemas podem auxiliar no entendimento de como o sistema reage ao meio (CHECKLAND, 1989) (também entendendo como esse meio se comporta) e sua ajuda nas ações de nível estratégico relacionadas à capacidade produtiva dentro do sistema. Com o advento da tecnologia, ferramentas computacionais possibilitaram desenvolver modelos de simulação capazes de auxiliar no entendimento do sistema (BARIONI et al., 2002), suas relações com o meio e as respostas frente às condições do clima.

Conforme já mencionado, a aleatoriedade na distribuição das precipitações não permite ao pecuarista saber a quantidade de alimentos a ser produzido durante a estação de crescimento. Contudo, tendo esta aleatoriedade um caráter estocástico (ANDRADE et al., 2006; SILVA et al., 2013), a modelagem estocástica pode auxiliar no entendimento dos fenômenos climáticos, notadamente da precipitação e com isso afastar-se do empirismo da produção de forragem anual. Por outro lado, os sistemas de produção são complexos e não se limitam apenas em quanto foi produzido na estação das águas. O dinamismo de uma

propriedade rural é multifacetado, abrangendo aspectos biológicos, climáticos, operacionais e sociais.

Perante o exposto, na tentativa de diminuir as incertezas, calculando e estimando os riscos da produção vegetal e o dinamismo desta na propriedade rural, é apresentada neste trabalho a metodologia de cálculo do sistema de gestão da produção de biomassa garantida para o Semiárido brasileiro (Sistema Asa Branca). O método consiste no uso de ferramentas de predição de biomassa forrageira pelo uso de modelos mecanicistas de base estocástica, utilização de *softwares* para análise probabilística e abordagem geral do sistema por meio da Dinâmica de Sistemas.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Etapa 1: Colheita de dados de campo

Localização da área experimental

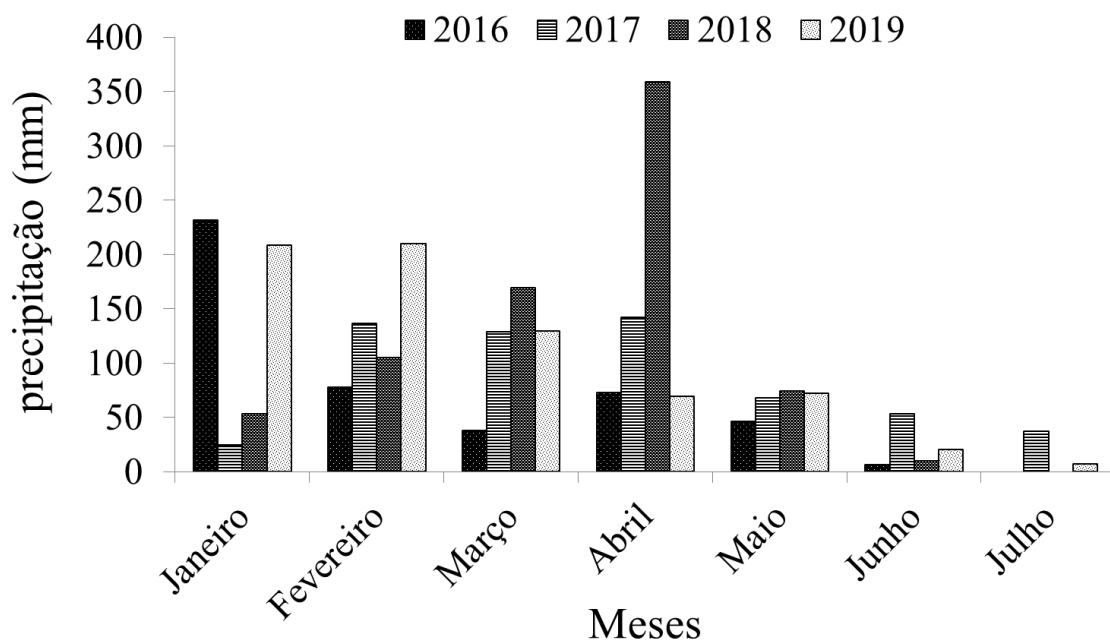
O experimento foi conduzido na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE) do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Limoeiro do Norte, na Chapada do Apodi, Ceará. A área experimental é caracterizada por relevo plano e pela predominância de solos da classe dos Cambissolos (SANTOS et al., 2018) com coordenadas geográficas de 05°10'5" S e 38°00'43" W e altitude de 146 m (Figura 1). O clima é quente e semiárido, classificado como BSw'h', de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (KÖPPEN, 1936) caracterizada por uma estação chuvosa (janeiro a julho) e outra seca (agosto a dezembro) (Figura 2).

Figura 1 - Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE) do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), na Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE



Fonte: Google Earth

Figura 2 - Precipitação pluviométrica (mm) verificada em estação meteorológica presente na área experimental nos anos de 2016, 2017, 2018 e 2019 na Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE



A área experimental era composta por parcelas de 10 x 28 m de comprimento, cultivadas com culturas forrageiras estratégicas para uso em regime de sequeiro: capim-buffel (*Pennisetum ciliare* (L.) Link; syn. *Cenchrus ciliare*), capim-massai (*Megathyrsus maximus* (Jacq.) B.K. Simon & S.W.L. Jacobs; syn. *Panicum maximum*) e palma forrageira (*Opuntia stricta* [Haw.] Haw.), com três repetições (parcelas) para cada cultura.

Os capins buffel e massai foram implantados no início do período chuvoso de 2016. A colheita anual da biomassa (2017; 2018 e 2019) foi realizada após o início da queda das sementes, uma vez que esta idade fisiológica coincide com o máximo acúmulo de biomassa (condição exigida para uma melhor modelagem do crescimento da cultura) ao mesmo tempo em que permite um aporte anual de sementes para manutenção do *stand* (Figura 3).

Figura 3 - Plantio do capins búffel e massai em linhas de 0,30 cm (esquerda) e detalhe para o ponto de colheita de biomassa do capim-buffel (direita)



Fonte: Rodrigo Gregório da Silva.

O corte dos capins buffel e massai foi realizado a aproximadamente 5,0 cm do solo para colheita do máximo acúmulo de biomassa da cultura no período de crescimento. Para colheita do material foi utilizada moldura de 1,0 m², com três repetições para cada parcela experimental. Após obtenção do peso fresco, as amostras foram levadas para estufa de ventilação forçada a 65 °C até atingir peso constante para determinação da matéria seca.

A palma forrageira foi implantada no ano de 2016, sendo adotado o espaçamento de 1,5 m entre linhas (Figura 4, esquerda). O corte anual da palma forrageira (2017; 2018 e 2019) foi realizado a partir do cladódio secundário (Figura 4, direita), 45 dias após a última precipitação, caracterizando o máximo acúmulo de matéria seca da cultura (NOBEL, 2003).

Figura 4 - Espaçamento de 1,5 m entre linhas de cultivo (esquerda) e detalhe para a permanência do cladódio basal no momento do corte da palma forrageira (direita)



Fonte: Samuel Rocha Maranhão.

Como manejo de adubação, tendo como referência Araújo Filho et al., (1988) para regimes de sequeiro no Semiárido brasileiro, as culturas receberam no início da estação chuvosa uma dose equivalente a 100 kg de P ha⁻¹, tendo como fonte do nutriente o fosfato diamônico ((NH₄)₂HPO₄ – 46-50% de P). Esta adubação também já garante a oferta de nitrogênio, presente neste fertilizante, na dose de 20 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹.

Para estimativa da produtividade, foi contabilizado o número de plantas e de cladódios por metro linear. As plantas foram colhidas para a amostragem do peso fresco, com três repetições para cada parcela. Cada parcela de 280 m² continham seis linhas de cultivo de 10 x 28 m cada, perfazendo uma densidade aproximada de 31.320 plantas ha⁻¹.

Depois de obtido o peso fresco, foram selecionados de dois a três cladódios representativos de cada planta para picagem. Em seguida o material foi acondicionado em embalagens, levados para estufa de ventilação forçada a 65 °C, sendo movimentados diariamente até atingir peso constante, para determinação da matéria seca.

2.2 Etapa 2: Parametrização, calibração e validação do modelo PHYGROW

O PHYGROW (*Phytomass Growth Model*) é um modelo de simulação, de base diária, que usa informações climáticas, da vegetação, do solo e dados do rebanho para estimar o crescimento vegetal, consumo de forragem e processos hidrológicos (STUTH et al., 2003). O modelo permite simular o crescimento de várias espécies forrageiras e o efeito do pastejo por uma gama de herbívoros domésticos e silvestres e taxas de lotação.

Os dados climáticos como precipitação, radiação, umidade do ar etc. são disponibilizados no próprio *software* que importam os históricos de variáveis do clima diretamente da *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA), desenvolvida em cooperação com a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

Neste trabalho foi utilizado o PHYWEB, versão virtual do PHYGROW, que apresenta uma interface mais acessível e uma parametrização prévia da cultura a ser modelada. Para a caracterização do sítio ecológico o modelo exige um conjunto de informações do solo e da vegetação: como o tipo de cobertura vegetal e classificação, classe textural do solo, latitude e longitude, inclinação do terreno, elevação, tipo de composição da camada inferior do solo, armazenamento de água superficial, porcentagem de solo exposto e de rochas na superfície do solo, cobertura do solo pela vegetação e valores máximo e mínimo do número da curva de condição SCS (*Soil Conservation Service* – calculado automaticamente após a caracterização do solo).

Ao escolher uma forrageira no banco de dados, o *software* carrega informações genéricas da cultura, cabendo ao usuário parametrizar aquelas mais sensíveis ao modelo e aquelas necessárias para a primeira modelagem da cultura no sítio ecológico (Tabela 1). Os dados ou parâmetros da vegetação são utilizados para descrever de forma criteriosa a morfofisiologia da espécie vegetal a ser modelada, e são agrupados em parâmetros básicos (Tabela 2) e parâmetros avançados (Tabela 3).

Tabela 1 - Parâmetros para a primeira modelagem da planta no sítio ecológico

Variáveis	Buffel		Massai		Palma	
	I*	F*	I	F	I	F
Altura do dossel (cm)	100	60	150	80	60	80
Cobertura vegetal (%)	-	90	-	70	-	24
BFT (kg de MS ha ⁻¹)	2.500	5.000	5.000	5.000	15.000	7.000
Textura do solo	Arg	Arg	Arg	Arg	Arg	Arg
Índice de área foliar (m ² m ⁻²)	2,5	2,5	3,2	3,5	2,5 [¥]	1,5 [¥]
Profundidade do solo (cm)	80	120	80	120	80	120
Profundidade das raízes (cm)	30	100	120	40	183	30

Nota: BFT (Biomassa de Forragem Total); Arg (Argilosa); [¥] (Índice de área de cladódios); *Modelo inicial do PHYGROW (I) contendo os parâmetros genéricos da planta e modelo final contendo os parâmetros medidos (F) em campo que foram alterados pelo usuário.

Tabela 2 - Parâmetros básicos da planta no *software* PHYGROW

Variáveis	Buffel		Massai		Palma	
	I*	F*	I	F	I	F
Cobertura (%)	-	90	-	70	-	24
Índice de área foliar (m ² m ⁻²)	2,5	2,5	3,2	3,5	2,5 [¥]	1,5 [¥]
Relação da matéria seca para radiação (g MS MJ ⁻¹)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2
Temperatura de supressão (°C)	34	42	35	40	42	42
Temperatura ótima (°C)	21	27	20	25	27	18
Temperatura basal (°C)	7	5	6	6	6	6
Taxa de decaimento foliar (%)	3	3	12	3	1	0,5
Taxa de senescência foliar (%)	3	3	3	3	1	0,5
Taxa de decaimento das folhas dormentes (%)	3	3	5	3	1	0,5
Taxa máxima de decomposição da serapilheira (%)	21	21	21	21	5	5
Relação das folhas para a biomassa total [€]	1	1	1	1	1	1
Taxa de renovação dos galhos (%) [€]	0,5	0,5	0	0,5	0,05	0,05

Nota: [¥] (Índice de área de cladódios); [€] (componente arbustivo/arbóreo); *Modelo inicial do PHYGROW (I) contendo os parâmetros genéricos da planta e modelo final contendo os parâmetros medidos (F) em campo que foram alterados pelo usuário.

Tabela 3 - Parâmetros avançados da planta no *software* PHYGROW

Variáveis	Buffel		Massai		Palma	
	I*	F*	I	F	I	F
Teor de água da folha na floração	0,5	0,5	0,4	0,5	0,9	0,9
Teor de água da folha no crescimento	0,6	0,6	0,6	0,6	0,9	0,9
Teor de água da folha no declínio do crescimento	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,8
Teor de água da folha na frutificação	0,4	0,4	0,3	0,4	0,8	0,8
Teor de água da folha na dormência	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,8
Teor de umidade da madeira no florescimento	0	0	0	0	0,9	0,9
Teor de umidade da madeira no crescimento	0	0	0	0	0,9	0,9
Teor de umidade da madeira na dormência	0	0	0	0	0,8	0,8

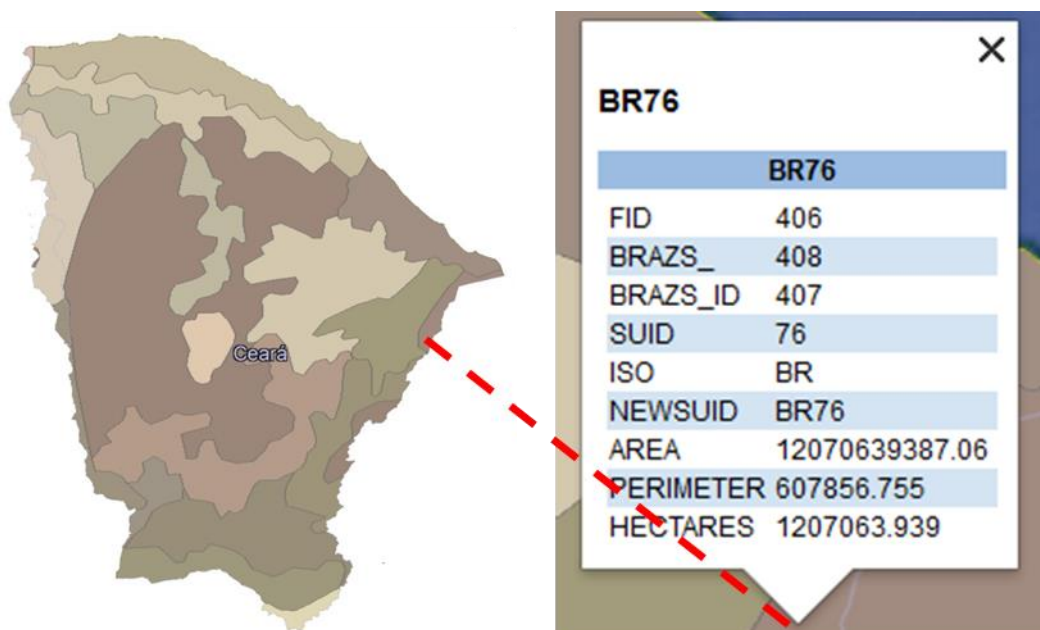
Teor de umidade da madeira na frutificação	0	0	0	0	0,8	0,8
Lado direito da Curva de Temperatura	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Lado esquerdo da Curva de Temperatura	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Acúmulo de unidade de calor na semente (°C)	0	0	0	0	0	0
Acúmulo de unidade de calor na matéria morta (°C)	0	0	0	0	0	0
Comprimento das raízes (cm)	30	120	120	40	183	30
Forma de crescimento	Grami	Grami	Grami	Grami	Shrub	Shrub
Altura do dossel (cm)	60	100	150	80	60	80
Máxima biomassa acima do solo (kg de MS ha ⁻¹)	2.500	5.000	5.000	5.000	15.000	7.000
Índice de área das hastes	0	0	0	0	0,1	0,1
Capacidade de armazenamento de água da folha (g de água g de MS ⁻¹)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,9	1,9
Acúmulo de unidade de frio para congelar a folha (°C)	0	0	0	0	1,5	1,5
Diâmetro da base do dossel (cm)	5	15	15	18	10	10
Diâmetro da copa (cm)	15	45	45	65	60	60
Altura no início da rebrotação (cm)	2	2	2	2	5	5
Altura no início da curvatura do dossel (cm)	5	50	10	50	15	15
Taxa máxima de decomposição da serrapilheira do caule (%)	0	0	0	0	1	1
Fração da água transferida da folha para o caule (%)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,5	1,5
Capacidade de armazenamento de água na serrapilheira de folhas (g de água g de MS ⁻¹)	0	0	0	0	1	1
Capacidade de armazenamento de água na serrapilheira do caule (g de	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

água g de MS ⁻¹)						
Contribuição para a condição hidrológica do sítio ecológico	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Duração mínima de horas dia ⁻¹ exigida para o crescimento	1	1	1	1	1	1

Nota: Grami (Graminiforme); Shrub (Arbustiforme); *Modelo inicial do PHYGROW (I) contendo os parâmetros genéricos da planta e modelo final contendo os parâmetros medidos (F) em campo que foram alterados pelo usuário.

Os parâmetros de solo são inseridos após a escolha da base de dados no *software*. A base de solos no PHYGROW é selecionada em arquivo .KMZ na plataforma do *Google Earth*. Para o estado do Ceará estão disponíveis 13 classes ou grupos de solos com características semelhantes. Em cada grupo existem subníveis contendo características diferentes, como número de horizontes, textura, profundidade efetiva, entre outros. Neste estudo foi selecionada a classe BR 76, com coordenadas 05°10'5" S e 38°00'43", local exato da área experimental na Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE (Figura 5). Os parâmetros de solo ainda incluem outras variáveis (Tabela 4), com destaque para “*Rock Factor*”.

Figura 5 - Banco de dados de solos do *software* PHYGROW disponível na plataforma *Google Earth*



Fonte: *Google Earth*.

Tabela 4 - Parâmetros do solo no *software* PHYGROW

Parâmetros do Solo	BR76 (Cambissolos)	
	I*	F*
Nome da camada do solo	CMe_D1	CMe_D1
Ordem da camada	1	1
Espessura da camada (cm)	20	20
Fator de rocha (cm ³ cm ⁻³)	0,01	0,18
Condutividade hidráulica saturada (cm hr ⁻¹)	0,24	0,24
Densidade aparente (g cm ⁻³)	0,36	0,36
Conteúdo volumétrico de água a 0 bar (cm ³ cm ⁻³)	0,51	0,51
Conteúdo volumétrico de água a -1/3 bar (cm ³ cm ⁻³)	0,33	0,33
Conteúdo volumétrico de água a -15 bar (cm ³ cm ⁻³)	0,2	0,2
Densidade aparente seca (g cm ⁻³)	1,36	1,36

Nota: *Modelo inicial do PHYGROW (I) contendo os parâmetros genéricos do solo e modelo final contendo os parâmetros medidos (F) em campo que foram alterados pelo usuário.

A variável *Rock Factor* representa o volume de fragmentos de rocha (pedaços de rocha não agregadas iguais ou maiores que 2 mm de diâmetro) que estão presentes na camada do solo. É uma razão entre o volume de fragmentos de rocha e o volume total da camada de solo (cm³ cm⁻³). É comumente determinado em análise de solo e também podem ser encontrados valores de referência na literatura. Os aumentos neste parâmetro diminuem a água disponível para a planta. É importante que este parâmetro esteja corretamente determinado, pois influencia diretamente a capacidade de retenção de água no solo e, portanto, a água disponível para as plantas. Esta variável é utilizada nas equações das demais variáveis de solo.

Para a obtenção destes dados, foram colhidas amostras de solo indeformadas na camada de 0 a 0,20 m em vários pontos das parcelas do capim-buffel, capim-massai e palma forrageira, com o auxílio de um trado (Figura 6). Após a coleta o solo foi levado para estufa a 105 °C por 72 horas. Depois de atingida temperatura ambiente, as amostras foram pesadas integralmente e registrado os pesos. Logo em seguida as amostras foram peneiradas em malha de 2 mm, sendo pesadas novamente, o que ficou retido na peneira, e anotado o seu peso. Por diferença percentual obtemos o *Rock Factor* dado em volume de solo (cm³ cm⁻³) (Figura 7).

Figura 6 - Coleta de amostras de solo indeformada



Fonte: Samuel Rocha Maranhão.

Figura 7 - Pesagem da amostra de solo indeformada e seca em estufa a 105° C (esquerda) e detalhe para as frações de solo maiores que 2 mm (direita)



Fonte: Samuel Rocha Maranhão.

Após a parametrização, o modelo é executado e recebe os primeiros conjuntos de dados para a calibração. Por se tratar de culturas em regime de sequeiro, tendo como objetivo identificar o máximo acúmulo de biomassa das culturas, os dados foram inseridos a cada ano. Os modelos em seguida foram submetidos a testes estatísticos para averiguação da validação das simulações. Para verificar a exatidão do modelo, utilizam-se o estimador viesado (%) (ANGERER, 2010), erro médio absoluto (MAE) (LEGATES et al., 1999) e raiz do quadrado médio do erro (RMSE) (WILLMOTT, 1982). Ainda foram verificadas medidas de erro relativo dos modelos por meio do teste de eficiência da estimativa (EE) e índice de concordância (d) (LEGATES et al., 1999).

2.2.3 Etapa 3: o método de Monte Carlo

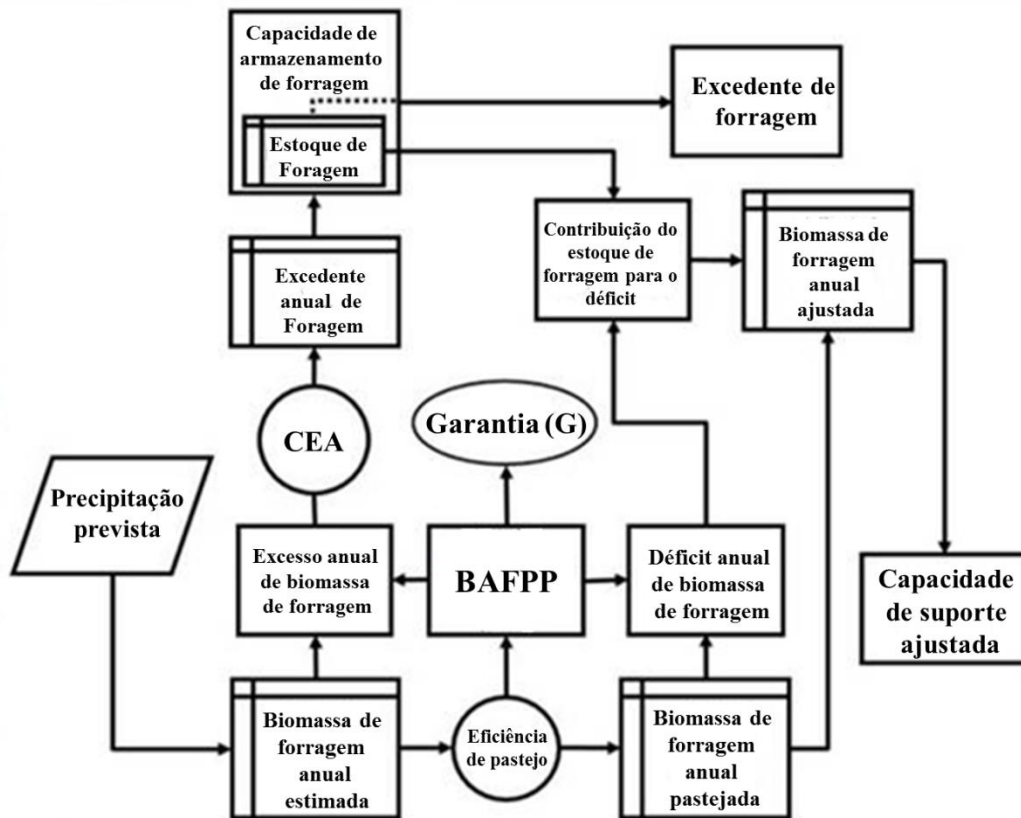
Para a aplicação do método de Monte Carlo foi gerado um histórico de 69 anos (1950-2019) no *software* PHYGROW e posteriormente selecionado o maior valor de biomassa de cada ano para cada cultura. As séries históricas foram submetidas ao @RISK[®], componente do *DecisionTools Suite 8.0.0 package* (Palisade Corporation, 2020), para identificação da função densidade de probabilidade (teste de aderência) que melhor descreve o comportamento da variável, pelo teste do qui-quadrado.

Para diminuir o erro natural das estimativas e possibilitar o surgimento de novos valores prováveis de biomassa contemplados pela função, foram geradas séries sintéticas longas de dados ainda no *software* @RISK[®]. Cada nova série sintética gerada recebe uma nova *seed*, ou semente aleatória, que significa um novo número usado para inicializar o gerador de números pseudoaleatórios, gerando séries aleatórias distintas.

2.2.4 Etapa 4: o conceito de garantia

Em seguida, as séries sintéticas de dados foram utilizadas para aplicação do conceito de garantia, adaptado de Silva et al., 2013 e Cândido et al., 2021 (Figura 8), que é a base para o sistema de gestão da produção de biomassa garantida (Sistema Asa Branca). O método proposto busca confrontar a capacidade do sistema em fornecer uma oferta de forragem estabilizável ao longo do tempo, frente à variação natural da produção de biomassa. Esta estabilidade é associada a um nível de garantia, ou seja, associada a uma probabilidade.

Figura 8 - Diagrama do Sistema de Garantia de Forragem Estabilizada



Fonte: Adaptado de Cândido et al. (2021). Nota: CEA = colheita e eficiência e armazenamento; BAFPP = biomassa anual de forragem pretendida para pastejo.

Para isso, é contabilizado o balanço de uma dada demanda (que o sistema deve verificar sua possibilidade, associado a uma garantia) com a produção observada de biomassa de forragem total (BFT). O balanço desta demanda com produção de BFT resulta em duas situações: (1) ter excedentes de forragem (produzidos nos anos que a produção de BFT seja superior à demanda testada), que podem ser transferidos para uma reserva, cuja capacidade de manter a oferta regular de forragem, associada a uma dada garantia de sucesso, é testada; e (2) ter déficit de forragem, em que o sucesso do estoque em fornecer suplemento de volumoso aos animais, tamponando o sistema, nos anos de menor produção de alimentos, ao longo do tempo, associado a um dado nível de garantia, apresenta-se como fundamento do método.

Por fim, foram realizadas simulações da capacidade de suporte da propriedade quando utilizada somente por pastagem natural e noutra condição, com capacidade de suporte da propriedade incrementada, sendo esta via a utilização de culturas forrageiras estratégicas, em conjunto ao pasto natural. As simulações levam em conta a aplicação de um nível de garantia

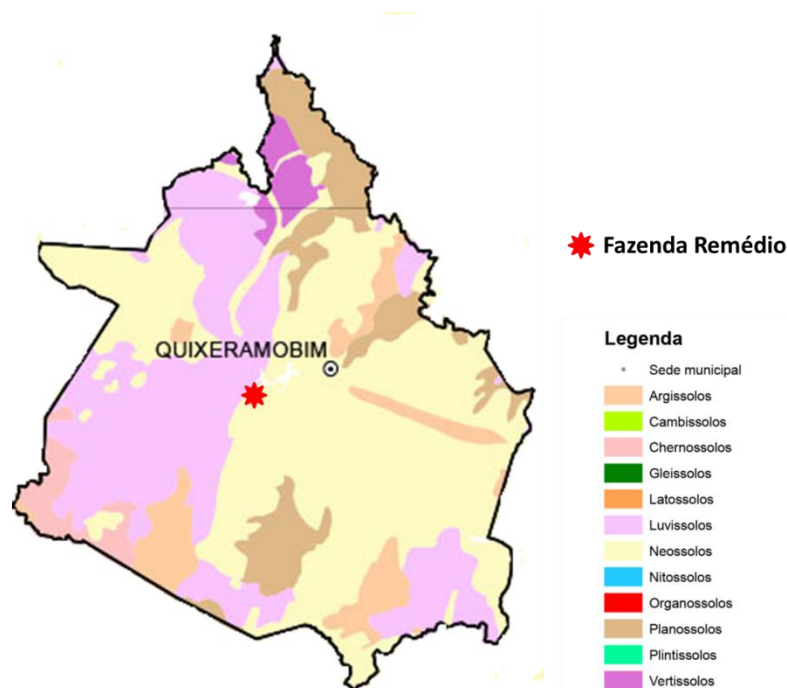
e diferentes combinações de uso da terra, buscando-se a máxima eficiência e carga animal ajustada da propriedade.

2.2.5 Aplicação do conceito de garantia à unidade de produção

Para aplicação da metodologia do conceito de garantia, foi selecionada a Fazenda Remédio, localizada em Quixeramobim-CE ($5^{\circ}13'59,07''$ O e $39^{\circ}25'53,96''$ S). A propriedade abrange três classes de solos característicos da região semiárida brasileira, os Argissolos, os Luvissolos e os Neossolos (IPECE, 2020; MARQUES et al., 2014) (Figura 9).

Foi realizado zoneamento da área em função das áreas de reserva legal e proteção permanente e das classes de solo e suas aptidões potenciais (LIMA JÚNIOR, 2014) (Tabela 5). A área de baixo apresenta solos do tipo Neossolos (aluvião). As áreas com potencial para formação de pastagens cultivadas possuem solos do tipo Argissolo. E as áreas de pastagens naturais contemplam os solos do tipo Luvissolos.

Figura 9 - Localização espacial da Fazenda Remédio e distribuição das classes de solos no município de Quixeramobim-CE



Fonte: Adaptado de IPECE, 2020.

Tabela 5 - Zoneamento da propriedade conforme as áreas de reserva legal e proteção permanente e das classes de solo e suas potenciais aptidões

Zoneamento	Área (ha)	% do imóvel
Reserva legal	59,2	19,7
Área de proteção permanente	35,6	11,8
Área de baixio (potencial de irrigação)	11,0	3,6
Área com potencial para formação de pastagens cultivadas	81,8	27,2
Áreas de pastagens naturais	104,9	34,9
Reservatórios	8,3	2,7
Total	300,7	100,0

Fonte: Adaptado de LIMA JÚNIOR, (2014).

A calibração do PHYGROW, com base nos modelos de crescimento das culturas (capim-buffel, capim-massai e palma forrageira) desenvolvidos no município de Limoeiro do Norte-CE, foi utilizada para realizar as simulações das forrageiras na Fazenda Remédio. Para isso, cada novo cenário para esta unidade de produção, derivado das culturas modeladas, receberá uma parametrização (PHYGROW), baseadas nas características da Fazenda Remédio, envolvendo dados do relevo, das características do solo e coordenadas locais.

Será também utilizada a calibração do PHYGROW, com base num modelo de crescimento da vegetação natural da caatinga obtido em Sobral-CE (MORAES, 2021), para simulação das áreas de vegetação natural da propriedade.

Para a modelagem da produção de BFT da área de baixio, utilizado o modelo de crescimento do capim-massai, uma vez que esta gramínea se mostra tolerante ao encharcamento temporário do solo (MARANHÃO et al., 2021; POMPEU et al., 2018), condição natural destes ambientes. Com relação às áreas com possibilidade de uso de forrageiras cultivadas, serão utilizados modelos de crescimento do capim-buffel e palma forrageira. Nas demais áreas, simulação da BFT das pastagens naturais.

Após a geração dos modelos para a Fazenda Remédio, as séries históricas das culturas e da pastagem natural foram submetidas ao método de Monte Carlo, realizado os testes de aderência, identificação da função densidade de probabilidade e geração das séries sintéticas para etapa de aplicação do modelo de garantia.

Foram utilizadas eficiências do uso da forragem (EUF), de acordo com a cultura e ambiente em que esta seria manejada. Para o capim-buffel, foi adotada EUF de 60%, devido às melhores características estruturais e de rebrotação da planta quando manejada mais

intensivamente (MARANHÃO et al., 2019; POMPEU et al., 2018). Com relação ao capim-massai, foi tomada EUF na ordem de 70%, considerando a maior fertilidade natural e capacidade de retenção de água dos solos aluviais (MARQUES et al., 2014; SANTOS et al., 2018). Com respeito à pastagem natural, foi aplicada EUF de 50% (ARAUJO FILHO, 2013; HOLECHEK, 1988). Para a palma forrageira, uma vez que o manejo da cultura preconiza a remoção quase total da biomassa vegetal, foi preconizada EUF de 90%.

Para a avaliação de cenários de utilização do componente palma-forrageira, foram consideradas diferentes combinações de uso da terra para a área agricultável da propriedade de 81,8 ha (Tabela 5). As culturas da palma forrageira e capim-buffel foram escolhidas para combinações em que a menor área em dado arranjo corresponda a 25% da área:

- 100% capim-buffel e 0% palma forrageira (81,8 ha e 0,0 ha, respectivamente);
- 75% capim-buffel e 25% palma forrageira (61,3 ha e 20,4 ha, respectivamente);
- 50% capim-buffel e 50% palma forrageira (40,9 ha e 40,9 ha, respectivamente);
- 25% capim-buffel e 75% palma forrageira (20,4 ha e 61,3 ha, respectivamente);
- 0% capim-buffel e 100% palma forrageira (0,0 ha e 81,8 ha, respectivamente).

Assim foram estipulados cinco modelos de uso e ocupação das áreas com potencial de produção de biomassa da Fazenda Remédio (Quadro 01):

Quadro 1 - Modelos de uso e ocupação das áreas com potencial de produção de forragem na Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE

Modelo 01: PN (104,9 ha) + CM (11 ha) + CB (81,8 ha) + PF (0,0 ha)

Modelo 02: PN (104,9 ha) + CM (11 ha) + CB (61,3 ha) + PF (20,4 ha)

Modelo 03: PN (104,9 ha) + CM (11 ha) + CB (40,9 ha) + PF (40,9 ha)

Modelo 04: PN (104,9 ha) + CM (11 ha) + CB (20,4 ha) + PF (61,3 ha)

Modelo 05: PN (104,9 ha) + CM (11 ha) + CB (0 ha) + PF (81,8 ha)

Nota: PN (pasto natural); CM (capim-massai); CB (capim-buffel); PF (palma forrageira).

2.3 Resultados e discussão

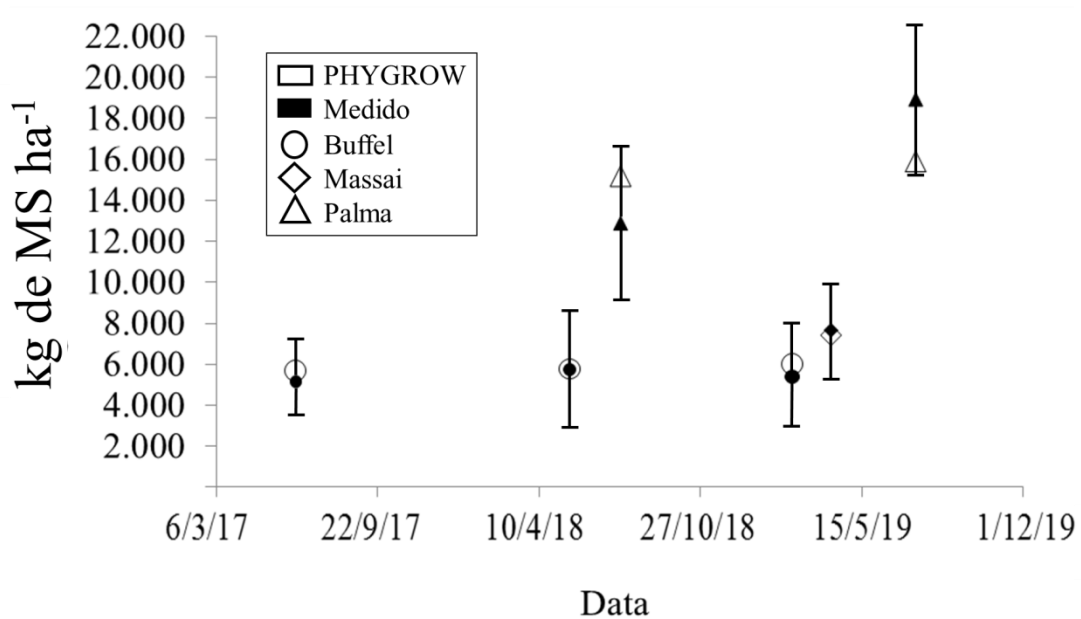
2.3.1 Performance do modelo de simulação PHYGROW

O modelo PHYGROW mostrou-se útil para estimar o crescimento das forrageiras capim-buffel, capim-massai e palma forrageira (Figura 10). A simulação para o capim-buffel exigiu apenas um conjunto de dados (2017) para a calibração, depois disso os parâmetros do modelo não foram mais ajustados. Nos anos de 2018 e 2019 os novos conjuntos de dados adicionados reiteram a capacidade preditiva do modelo, sendo, portanto, considerado como validado.

Já a simulação para o capim-massai, devido às dificuldades para implantação e estabelecimento da cultura, o modelo conta com apenas um conjunto de dados (2019) para calibração (Figura 10). Contudo, é pertinente destacar que, apesar dos poucos dados de campo, foram necessários poucos ajustes para a calibração, o que classifica o modelo como útil.

Com relação à modelagem da palma forrageira, foram exigidos dois conjuntos de dados (2018 e 2019) para calibração (Figura 10). Por se tratar de uma cultura perene e de crescimento naturalmente demorado, os dados observados indicam tendência de maior produtividade da cultura com o passar do tempo, o que exige nova calibração do modelo, em segundo momento, para melhorar a acurácia das estimativas.

Figura 10 - Predição da biomassa de forragem total (kg de matéria seca ha⁻¹) do capim-buffel, capim-massai e palma forrageira na Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE, pelo modelo PHYGROW



A BFT média observada e o desvio padrão do capim-buffel foram de $4.534 \pm 1.750,0$ kg de MS ha⁻¹, enquanto as estimativas do modelo foram de $5.147 \pm 542,5$ kg de MS ha⁻¹, mostrando maior variabilidade dos dados observados (Tabela 6). Verifica-se ligeira diferença entre o erro médio absoluto e erro quadrados médio da raiz, indicando que as estimativas do modelo e os dados de campo apresentaram poucas diferenças. Por meio do resultado positivo para a eficiência da estimativa e ajuste do índice de concordância, é possível conjecturar que o modelo de crescimento do capim-buffel apresenta boa capacidade de predição.

Tabela 6 - Estatística para avaliação da capacidade do modelo PHYGROW de simular o crescimento vegetal do capim-buffel, capim-massai e palma forrageira, em Limoeiro do Norte-CE

Estatística	Capim-buffel	Capim-massai	Palma forrageira
Médias observadas (kg MS ha ⁻¹)	5.495,0	7.422,5	12.887,0
Médias Estimadas (kg MS ha ⁻¹)	5.704,3	6.559,0	15.449,0
Desvio padrão (kg MS ha ⁻¹) [€]	1.750,7	1.966,9	4.679,9
Desvio padrão (kg MS ha ⁻¹) [¥]	542,5	980,8	390,2
Erro padrão (kg MS ha ⁻¹) [€]	424,6	879,6	1350,9
Erro padrão (kg MS ha ⁻¹) [¥]	131,5	438,6	112,6

Erro médio absoluto (kg MS ha ⁻¹)	118,5	171,2	412,0
Erro quadrado médio da raiz (kg MS ha ⁻¹)	488,9	382,9	1427,2
Erro médio da previsão (%)	3,8	-11,6	19,8
Eficiência da estimativa	0,3	0,8	-2,5
Índice de concordância	0,4	0,9	0,8
<i>N</i>	20	10	20

Nota: kg MS ha⁻¹ (quilograma de matéria seca por hectare); *n* (número de amostras); €(dados observados); ¥(dados estimados).

Para o capim-massai, verifica-se melhor ajuste entre os dados simulados e observados. O erro médio da previsão aponta para uma ligeira subestimativa do modelo, porém não é significativa, uma vez que o erro médio absoluto foi baixo (171,2 kg de MS ha⁻¹) (Tabela 6). A eficiência da estimativa e o índice de concordância foram altos, indicando uma correspondência alta das previsões do modelo de simulação e os dados observados quando dispostos em uma linha um a um (1:1). Os resultados apresentados para o capim-massai devem ser avaliados com ponderação, logo que, como mencionado, advém de um único conjunto de dados de campo. Contudo, estes resultados são satisfatórios e úteis para uma predição da biomassa no local estudado, uma vez que o modelo de crescimento do PHYGROW para o capim-massai apresentou uniformidade entre os picos da curva de simulação, resultado do provável efeito estabilizador do solo predominante da Chapada do Apodi (Cambissolos).

A avaliação do modelo de crescimento da palma forrageira também se mostrou satisfatória. Apesar da magnitude dos valores de BFT, o erro médio absoluto ficou abaixo de 500 kg de MS ha⁻¹ (Tabela 6). O erro médio da previsão, todavia, aponta uma superestimativa do modelo em 19,8%. A avaliação da capacidade do modelo se presta, além da própria atestação da habilitação, para trazer informações importantes para o usuário. Logo, sabendo que o modelo está sub ou superestimando os resultados, cabe ao modelador fazer as inferências técnicas necessárias para uma melhor estimativa das simulações para aplicação real.

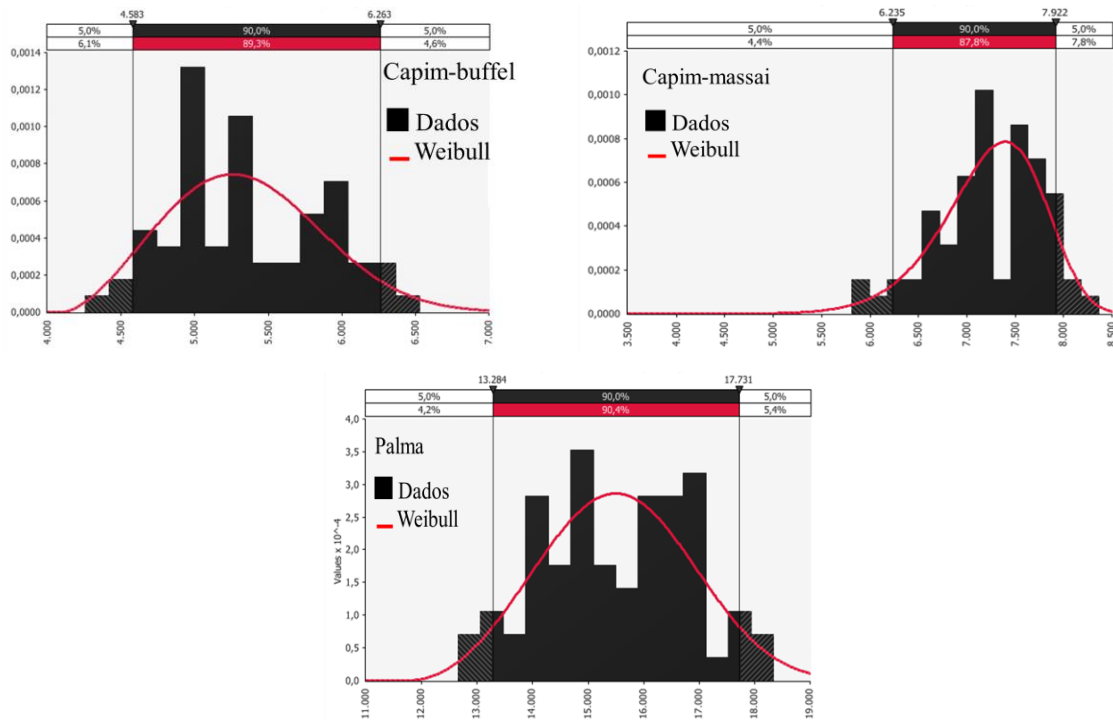
O modelo PHYGROW foi proposto para uso em pastagens naturais heterogêneas (STUTH, 2003) extensas e com grande variação de relevo, clima e solo. Quando parametrizado para uma monocultura e em uma menor escala geográfica, onde, os atributos do solo e da planta são bem determinados, as interações e os fatores de variação são menores. Isto traz uma estimativa mais “facilitada” para o *software*. Assim, os modelos das culturas capim-buffel, capim-massai e palma forrageira se mostraram capazes de estimar o

crescimento vegetal nas condições avaliadas, contudo, vale destacar a importância do critério técnico por meio das avaliações do modelo e da necessidade de recalibração após certo período. Esta recalibração, ou seja, nova entrada de dados de campo se faz necessário para averiguar a capacidade de predição do modelo, uma vez que o ambiente de cultivo é mutável ao menor erro de manejo ou mesmo a falta deste.

2.3.2 Função densidade de probabilidade e garantias naturais de produtividades das culturas

Os testes de aderência realizados por meio do *software* @RISK[®] mostraram na função tipo *Weibull*, como aquela que melhor descreve a distribuição dos dados anuais das culturas (histórico do PHYGROW), pelo teste de qui-quadrado (Figura 11). Os parâmetros da função *Weibull* (*mínimo*, *máximo*, *alpha*, *shift*, *média* e *seed*) são adequados para representar a natureza dos dados de crescimento das culturas. O parâmetro mínimo pode ser fixo (zero, por exemplo) e de estimativa indeterminada, o que auxilia o delineamento da função para não trazer valores negativos de biomassa, logicamente impossível do ponto de vista biológico. O parâmetro máximo ($+\infty$) é limitado ao *alpha*, que controla a posição da curva sobre o eixo das abscissas, e a média ou fator de escala, que controla as possíveis dimensões que a curva pode assumir, não retornando valores improváveis máximos de biomassa.

Figura 11 - Ajuste da função tipo *Weibull* para o comportamento do histórico (estimado no PHYGROW) da produção de biomassa anual para o capim-buffel, capim-massai e palma forrageira na Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE



A linha de tendência da função *Weibull* para o capim-buffel revela ligeira assimetria positiva (0,324), com moda, mediana e média de 5.258; 5.315 e 5.343 kg de MS ha⁻¹, respectivamente e curtose platicúrtica (2,825) (Figura 11). A assimetria positiva e o achatamento da função podem sinalizar o surgimento de valores acima do máximo estipulado, o que é importante para a modelagem experimental, uma vez que esta tendência da função pode estar deduzindo uma subestimativa da produtividade da forrageira no local em estudo.

Em outras palavras, apenas pelos resultados de campo e estimados pelo *software* PHYGROW não seria possível conjecturar uma maior produtividade do capim-buffel na Chapada do Apodi, pois nos anos avaliados (2017, 2018 e 2019) não foi verificado maiores produções. Assim, a técnica da modelagem nesse caso traz a projeção de novas perspectivas de produtividade do capim-buffel, por exemplo, através do manejo mais intensivo da forrageira pelo uso de adubação nitrogenada é possível que surjam novos valores de produção contemplados pela função.

Com relação ao capim-massai, a linha de tendência da função já é oposta ao capim-buffel, apresentando assimetria negativa (-0,556), com média, mediana e moda de 7.232; 7.285 e 7.395 kg de MS ha⁻¹, respectivamente e curtose leptocúrtica (3,376) (Figura 11).

Assim como para o capim-buffel, agora de maneira contrária, a assimetria negativa da função leva ao surgimento de valores abaixo daqueles estimados pelo modelo PHYGROW, também importantes para a estimativa de piores cenários de crescimento vegetal.

A palma forrageira, por sua vez, apresenta linha de tendência da função com discreta assimetria positiva (0,125), com moda, mediana e média de 15.495; 15.516 e 15.537 kg de MS ha⁻¹, respectivamente e curtose platicúrtica (2,717) (Figura 11). Da mesma maneira que observado no capim-buffel, são esperados nas simulações futuras maiores valores acima dos dados obtidos em campo e simulados no PHYGROW. As culturas foram manejadas sob baixo nível de adubação, não permitindo a plena manifestação do potencial produtivo. Assim, ao observar a assimetria positiva, é suposto o surgimento de valores superiores pela função. O que de fato é esperado, posto que a tendência de crescimento da palma forrageira em campo, verificado na Figura 10, traz essa tendência de incremento na produção.

Nesta etapa, após os resultados de identificação da função densidade de probabilidade, é possível analisar os sistemas compostos por variáveis aleatórias, como é o caso da produção vegetal frente à precipitação pluviométrica (variável casual). Porém, é importante destacar que essa abordagem não é capaz de tornar o comportamento da produção de biomassa previsível estatisticamente, e sim permite a previsibilidade do comportamento da variável, de maneira probabilística.

Na Tabela 7 está apresentado um resumo das séries sintéticas de 1.000 valores para cada função (*Weibull*) do capim-buffel, capim-massai e palma forrageira. Por meio do aumento do número de simulações da variável, é esperado uma redução do erro. Esta é a premissa do Teorema do Limite Central, em que, quando o tamanho da amostra aumenta, a distribuição amostral da sua média aproxima-se cada vez mais de uma distribuição normal (KWAK; KIM, 2017).

O *software* @RISK[®] cria as séries sintéticas de dados por meio de um algoritmo gerador de números aleatórios. Os números aleatórios não são necessariamente aleatórios, ou seja, são séries de números aproximadamente independentes um dos outros, pois partem de um vetor, um valor ou uma semente (número inicial), em que é dado início à sequência “cíclica” a partir do qual os números são devolvidos pelo gerador (MIYAMOTO; SHIOHARA, 2020).

Tabela 7 - Séries sintéticas de dados de produção de biomassa do capim-buffel, capim-massai e palma forrageira, geradas por números pseudoaleatórios, com base na função *Weibull*

Séries sintéticas	Capim-buffel [<i>Weibull</i> (0, 1e+012, 2.579, 0, 5343, 1)]					
	1	2	3	4	...	1000
seed 01	4382,49	4177,65	5219,74	4210,05	...	4725,7
seed 02	6092,37	6454,34	4170,5	5122,31	...	6254,16
seed 03	4705,19	4827,09	4939,21	4687,9	...	4507,59
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
seed 10	6125,7	5779,74	6387,8	5318,19	...	6130,3
Séries sintéticas	Massai [<i>Weibull</i> (0, 1e+012, 8.368, 0, 7232, 1)]					
	1	2	3	4	...	1000
seed 01	7750,05	8055,38	7106,52	6805,15	...	6666,64
seed 02	7757,13	6936,25	7395,44	7340,89	...	6466,96
seed 03	7122,9	6953,26	7515,81	7682,84	...	6907,82
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
seed 10	6094,89	7669,59	7449,77	7787,24	...	7314,46
Séries sintéticas	Palma forrageira [<i>Weibull</i> (0, 1e+012, 3.138, 0, 15537, 1)]					
	1	2	3	4...	...	1000
seed 01	18357,9	17759,9	14176,2	16130,8	...	12152,6
seed 02	16054,4	20260,5	13674,3	15125,4	...	16609,3
seed 03	13844,8	14885,8	17079,9	13559,8	...	14192,2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
seed 10	16014,0	16142,1	15765,5	15323,2	...	14716,4

A garantia natural é definida como a produtividade de biomassa modelada, associada à um dado nível de garantia, resultante da flutuação natural da produção de biomassa de forragem, em função do potencial local (SILVA et al., 2013).

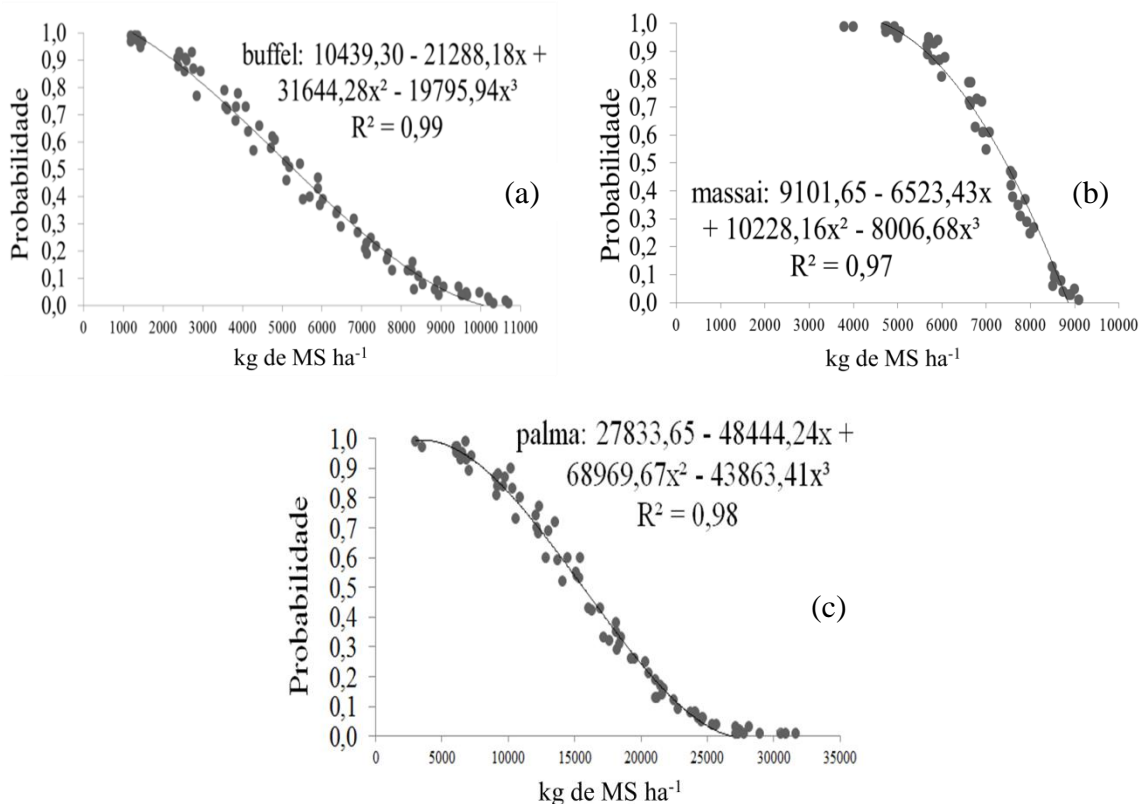
Com estes resultados, a estimativa da produção vegetal alcança um novo patamar, pelo fato de trazer uma associação de probabilidade ao sistema. De outra maneira, a probabilidade associada permite analisar os riscos da produção animal baseada em pastagem, ou seja, para aquela maior garantia de produção de biomassa, o efetivo animal deverá ser menor e seu inverso é verdadeiro.

Ou seja, o sucesso (garantia), que é a condição de ser ter quantidade de biomassa de forragem total igual ou superior à uma demanda do rebanho, tem na definição desta demanda, tendência a valores do lado esquerdo da curva, posição que garante serem observados valores superiores aos desejado/demandado, em sua maior proporção. Com a garantia de 95%, que é o

resultado mais conservador, são esperados naturalmente menores taxas de lotação animal, afinal, o modelo traz a expectativa mínima de produção de biomassa de forragem do local, garantida.

A garantia natural do capim-buffel estimada para a Chapada do Apodi, em Limoeiro do Norte-CE (Figura 12a), apresenta relação direta do aumento da oferta de forragem com a diminuição da probabilidade, ou seja, da garantia. Para uma garantia de 95%, é esperada uma produtividade de 1.802 kg de MS ha⁻¹, o que poderia alcançar uma taxa de lotação de 0,22 UA ha⁻¹, com uma eficiência do uso da forragem na ordem de 60%. Com uma menor garantia, de 50%, por exemplo, a produtividade esperada seria de 5.232 kg de MS ha⁻¹, o que traria um incremento na capacidade de suporte de 0,64 UA ha⁻¹, superior em aproximadamente 70%.

Figura 12 - Garantias naturais de produção de biomassa para o capim-buffel (a), capim-massai (b) e palma forrageira (c) na Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE



Para o capim-massai, é esperada uma produtividade de 4.623 e 6.176 kg de MS ha⁻¹, com as garantias de 95 e 50%, o que suportaria uma carga animal de 0,66 e 0,88 UA ha⁻¹, respectivamente, quando adotada uma EUF de 70% (Figura 12b). Neste exemplo, os elevados valores de MS ha⁻¹ conseguidos com a máxima garantia proposta (95%), se equiparado ao capim-buffel, são resultados principalmente do potencial produtivo da forrageira. A menor

faixa de amplitude dos valores estimados (3.500 a 9.500 kg de MS ha⁻¹) expressa uma maior homogeneidade da produção, porém deve ser avaliado com critério.

Do ponto de vista prático, uma produtividade acima de 3.000 kg de MS ha⁻¹ no pior dos cenários climáticos, ou seja, para anos onde a precipitação pluviométrica pode chegar a volumes mínimos, parece improvável. É nesse instante que o bom senso na avaliação dos modelos deve ser efetivo, sobretudo para uma nova parametrização, calibração e validação dos resultados, se necessário, de maneira a melhorar a acurácia das estimativas. É possível afirmar que o reduzido conjunto de dados medidos pode estar trazendo superestimativa da produção. Com a adição de novos dados de campo, em segundo momento, podem ser observados novos resultados, causando possíveis alterações no tipo de função de densidade de probabilidade que represente o crescimento do capim-massai no local em estudo.

As garantias naturais para a palma forrageira são ainda mais expressivas. Para as garantias de 95 e 50%, são esperadas uma produtividade de 6.449 e 15.371 kg de MS ha⁻¹, respectivamente (Figura 12c). É pertinente reforçar que essas estimativas são oriundas de plantas já estabilizadas na área e com uma EUF de 90%, sendo o material restante de campo composto pelos cladódios basais que permitirão a continuidade da perenidade da forrageira. A carga animal suposta para a palma forrageira seria o equivalente a 1,1 e 2,8 UA ha⁻¹ para as garantias de 95 e 50%, respectivamente.

Em uma análise dinâmica, o padrão de produção de biomassa de forragem total segue uma ordem crescente, partindo do capim-buffel < capim-massai < palma forrageira. Para uma mesma área, seguindo a ordem de 95% de garantia, os ganhos são de 0,44 UA ha⁻¹ do capim-massai em relação ao capim-buffel, 0,53 UA ha⁻¹ da palma forrageira em relação ao capim-massai e de 0,97 UA ha⁻¹ da palma forrageira em relação ao capim-buffel, respectivamente.

Contudo, cada forrageira apresenta diferentes respostas ao meio em razão do manejo e das características edafoclimáticas, sendo a escolha das forrageiras realizadas mediante análise particular da propriedade. Tomando como exemplo o capim-buffel em relação ao capim-massai, apesar da menor produtividade, aquela é mais garantida em razão da maior resiliência da forrageira aos extremos de falta de água, variação desta ao longo da estação e da mais rápida resposta aos menores volumes precipitados (BOTREL et al., 1998; OLIVEIRA et al., 1999; MARANHÃO et al., 2019).

A garantia natural, conforme foi exposto, já oferece um maior segurança ao produtor pela oferta mínima de forragem associada à um dado nível de probabilidade (por exemplo, garantia de 95%), trazendo melhor gestão alimentar para o rebanho. Ainda assim, temos um risco associado aos 5% do tempo, que podem não oferecer forragem suficiente para os

animais. Em outras palavras, no caso de uma sequência de vários anos de estiagem severa, a propriedade não estará segura, uma vez que o risco daqueles anos descobertos pela garantia pode acometer a oferta de forragem para o rebanho, podendo levar ao fracasso da atividade.

Para exemplificar, nos últimos 60 anos a região do Semiárido brasileiro experimentou inúmeras secas, muitas delas com anos consecutivos: uma seca de 8 anos; duas secas de 7, 6 e 5 anos; três secas de 4 anos; dez secas de 3 anos e 17 secas de 2 anos (LIMA e MAGALHÃES, 2019). Vários destes episódios consecutivos foram seguidos intercalados por um a dois anos de precipitações dentro da média, o que não oferece tempo suficiente para o ambiente se recompor. Nesse sentido, a garantia natural pode ser falha devido aos eventos extremos de seca, não sendo capaz de fornecer alimento devido à falta e da degradação causada na pastagem, delongando a recuperação do sistema.

Portanto, a proposta deste trabalho (*Metodologia de cálculo do sistema de gestão da produção de biomassa garantida para o Semiárido brasileiro - Sistema Asa Branca*), se resume a garantia associada a um estoque, estoque este caracterizado como uma reserva capaz de tamponar os anos ruins pelo excedente de forragem conseguido nos anos de maior produção. Diferente da garantia natural, em que há somente a definição de uma dada BFT, em que o há uma probabilidade de se ter pelo menos tal valor, sem um componente estabilizador.

Os resultados dos modelos de crescimento das culturas, a identificação da função densidade de probabilidade por meio do teste de aderência, a geração de séries sintéticas longas para redução dos erros das estimativas e a aplicação do modelo de garantia (SILVA et al., 2013) até então apresentados, são a base para a proposta a seguir, onde serão aplicados a metodologia em uma propriedade, incrementando o modelo proposto por Cândido et al. (2021) para a pastagem natural, através do uso de forrageiras cultivadas adaptadas ao regime de sequeiro.

2.3.3 O Sistema Asa Branca aplicado à unidade de produção

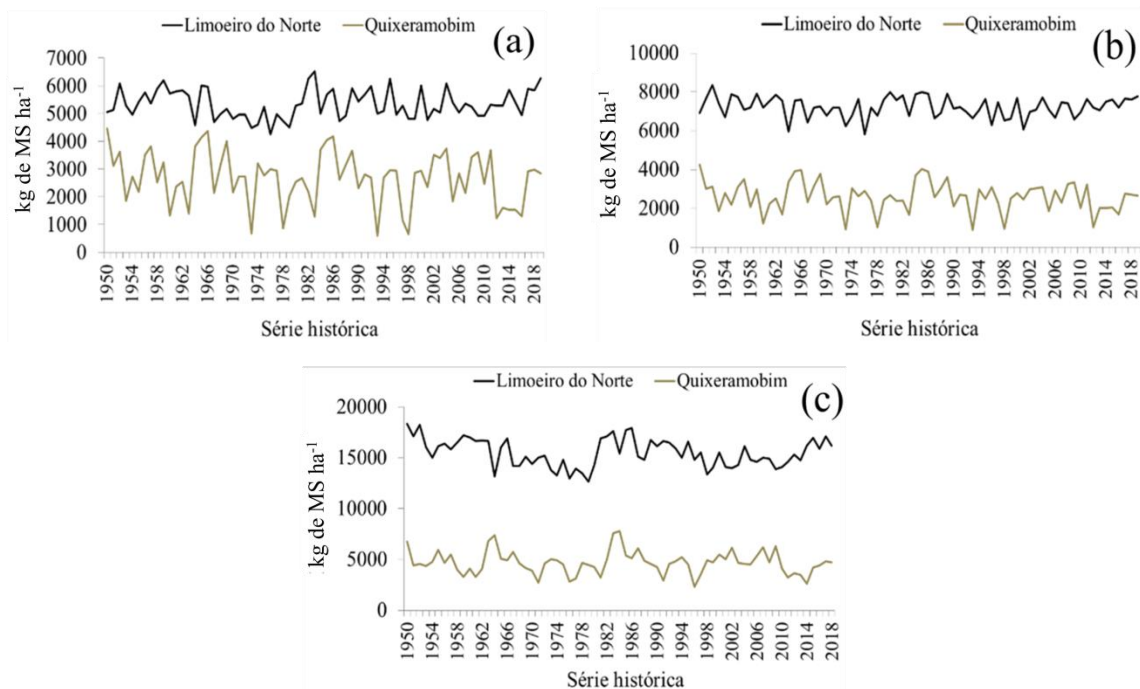
Um dos principais ganhos da modelagem mecanicista vem da possibilidade de aplicação de um modelo calibrado/validado de um local para outro, respeitando as características edafoclimáticas e geográficas de onde foi originado. Como exemplo deste estudo, o modelo PHYGROW, aplicado para a modelagem dentro dos domínios do Semiárido brasileiro, é plenamente capaz de simular o crescimento de uma cultura por meio da “extrapolação” de um modelo desenvolvido dentro daqueles limites. O modelo “derivado” recebe a parametrização do modelo original, sendo alteradas algumas variáveis importantes

para a modelagem da cultura no novo sítio ecológico, como o tipo de solo e as características do relevo. As variáveis climáticas, como a precipitação, são automaticamente ajustadas pelo PHYGROW para o novo local quando são inseridas as coordenadas geográficas.

Na Figura 13 estão apresentados os históricos de produção de biomassa das culturas simulados no PHYGROW para a Chapada do Apodi, em Limoeiro do Norte-CE, e os modelos derivados agora para a Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE. Verifica-se claramente a diferença de produtividade tanto em valores absolutos como em amplitude entre as séries históricas, o que revela uma maior variação da produção entre os anos para as séries derivadas.

O tipo de solo mostra-se como o fator mais impactante na diferença de produção entre os modelos primários e derivados. Para as três culturas simuladas no modelo derivado são observadas uma queda de produção entre os anos de 2012 e 2017, período de seca sensível no Semiárido brasileiro. Esta informação é importante, pois reflete a precisão do modelo em captar o fenômeno de seca associado à capacidade de retenção de água dos solos em estudo, sobretudo para os Argissolos, onde foi simulado o crescimento do capim-buffel (Figura 10).

Figura 13 - Série histórica da produtividade do capim-buffel (a), capim-massai (b) e palma forrageira (c) estimada (PHYGROW) para Chapada do Apodi, Limoeiro do Norte-CE e séries históricas derivadas dos modelos supracitados para a Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE

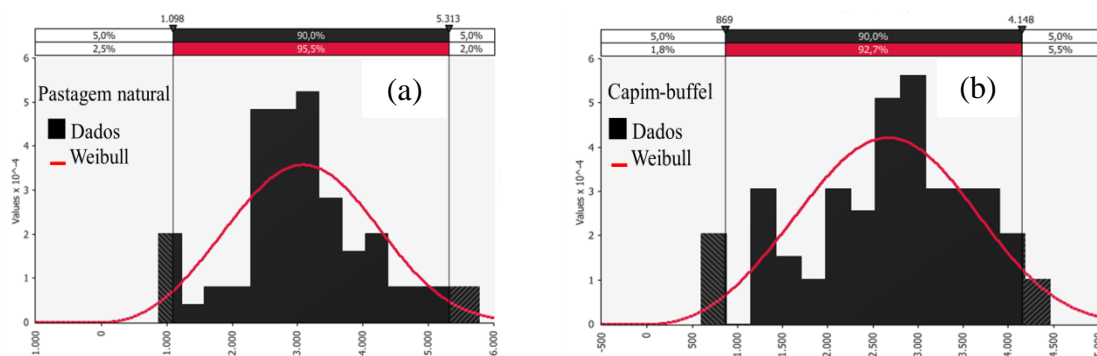


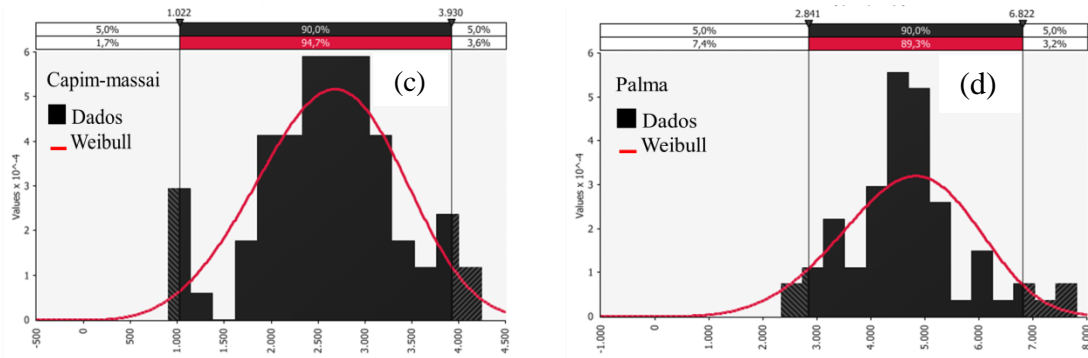
Os testes de aderência mostraram na função tipo *Weibull*, como aquela que melhor descreveu a distribuição dos dados dos modelos derivados das culturas em Limoeiro do Norte e da pastagem natural (MORAES, 2021) (Figura 14). O teste de aderência é fundamental para determinar o comportamento da produção vegetal no novo local e aumentar a acurácia dos modelos derivados, visto que cada ambiente apresenta características distintas.

No caso do modelo de crescimento da pastagem natural (Figura 14a), derivado do modelo desenvolvido por Moraes (2021) para a pastagem natural em Sobral-CE, a função apresenta leve assimetria positiva (0,109), com moda, mediana e média de 3.084; 3.093 e 3.107 kg de MS ha⁻¹, respectivamente, e curtose platicúrtica (2,714). Conforme já discutido, a assimetria positiva da função indica o surgimento de valores acima do observado em campo e estimado pelas séries sintéticas.

Esta prospecção vista na função, é importante para a modelagem mecanicista, uma vez que cada ambiente apresenta características particulares, por exemplo, de manchas de solos com elevada fertilidade natural e/ou com maior capacidade de retenção de água. Apenas com os dados medidos, não seria possível supor maiores produções. Através da função densidade de probabilidade é então permitido ao modelador estimar a produção para outros locais pela maior amplitude de dados apresentados. Para a pastagem natural, onde normalmente não é praticada a adubação, as estimativas dos maiores valores prováveis de biomassa do pasto natural são importantes, pois serão a garantia de estoque para os anos de menores produções.

Figura 14 - Ajuste da função tipo *Weibull* para o crescimento da pastagem natural (derivado do modelo de crescimento em Sobral, Ceará (MORAES, 2021)), do capim-buffel, capim-massai e palma forrageira (derivado do modelo de crescimento em Limoeiro do Norte-CE) para a Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE





Para o capim-buffel (Figura 14b), também é verificada uma discreta assimetria positiva (0,092), com moda, mediana e média de 2.670; 2.671 e 2.680 kg de MS ha⁻¹, respectivamente, e curtose platicúrtica (2,712). O modelo derivado mostra uma diferença expressiva de produção quando comparado ao modelo de crescimento do capim-buffel em Limoeiro do Norte (Figura 11).

As estimativas dos modelos derivados no presente estudo são um reflexo da extrapolação e podem apresentar falhas naturais na magnitude dos valores. Estas falhas são aceitáveis e esperadas, pois muitos dos parâmetros de crescimento da planta, como profundidade da raiz, índice de área foliar e altura do dossel, para citar alguns, são dados da planta fornecidos para o modelo primário. Assim, é normal que haja uma diferença de produção entre os modelos. Esta diferença, portanto, pode ser associada aos parâmetros, porém o maior impacto é dado pelo banco de dados de solo do modelo PHYGROW agora parametrizado para o modelo derivado. Para fins do presente estudo, os valores apresentados são suficientes e seguros para expressar o potencial da técnica à unidade de produção.

No caso do capim-massai, assim como observado no modelo primário em Limoeiro do Norte, foi observada na função uma assimetria negativa (-0,071), com média, mediana e moda de 2.617; 2.633 e 2.682 kg de MS ha⁻¹, respectivamente e curtose platicúrtica (2,740) (Figura 14c). A diferença mais expressiva da simulação derivada, associada à discrepância dos valores absolutos do modelo primário, está na distância da média para o valor zero de produção.

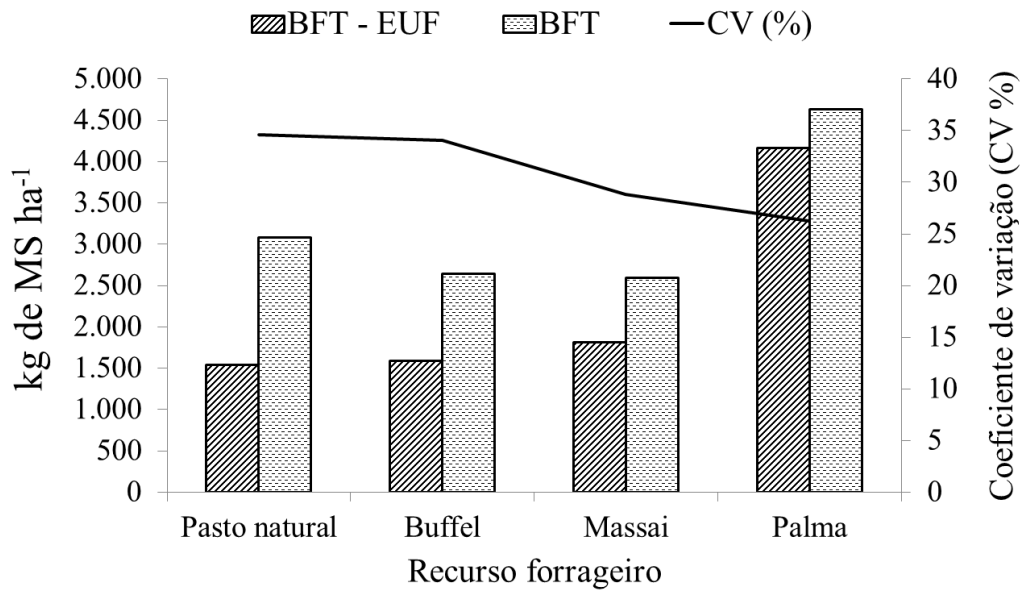
No modelo primário do capim-massai (Figura 11), o ponto médio foi de 7.232,9 kg de MS ha⁻¹, o que traz para aquele modelo uma maior probabilidade de surgirem valores menores de produção de biomassa, ainda não aferidos em campo (assimetria negativa da função). No modelo derivado, esta probabilidade é menor, logicamente pelos menores valores de produção simulados, o que mostra maior tendência de valores em torno da média.

A função com assimetria negativa (-0,150) também é verificada para o modelo derivado da palma forrageira, com média, mediana e moda de 4.674; 4.716 e 4.831 kg de MS ha⁻¹, respectivamente e curtose platicúrtica (2,786). O mesmo raciocínio apresentado para o modelo derivado do capim-buffel e capim-massai é aplicado à palma forrageira quanto a diferença de produção entre os modelos primários. A aferição de campo, quando a técnica for utilizada na unidade de produção é recomendada para elevar a acurácia das simulações.

Dando continuidade a metodologia, foram geradas as séries sintéticas de dados dos recursos forrageiros avaliados (10 séries de 1.000 valores) e analisados a produtividade média e o coeficiente de variação (Figura 15). Em regime de sequeiro, quanto maior for a heterogeneidade florística da pastagem, maior será a variação anual da biomassa produzida (Figura 15).

A variação é maior no pasto natural, explicado pela natural variação florística e disposição destas no tempo (caráter efêmero de algumas espécies). O capim-buffel apresenta a segunda maior variação em função de sua dependência da precipitação, porém, se tratando de um monocultivo, a oscilação da produção tende a ser mais estabilizada. No caso do capim-massai, a menor variação é explicada pelo fator solo. Os solos aluviais concentram por mais tempo umidade, tamponando os baixos regimes de chuva. A palma forrageira, portanto, mostra-se como aquela capaz de estabilizar a oferta de forragem na propriedade, pela maior eficiência no uso da água da chuva e maior produtividade, além da maior proporção de matéria seca colhível por área quando é considerada a EUF (Figura 15).

Figura 15 - Biomassa de forragem total (BFT), biomassa de forragem total – eficiência do uso da forragem (BFT-EUF) e coeficiente de variação (%) dos recursos forrageiros simulados para a Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE



Ao analisar a produção de biomassa da propriedade pelos modelos de uso e ocupação das áreas com potencial de produção de forragem expostos no Quadro 01, evidenciou-se que a substituição do capim-buffel pela palma forrageira aumentou a oferta de alimento (Figura 16) e, de maneira semelhante à variação da produtividade individual das forrageiras, com o aumento do percentual de ocupação da área agricultável pela palma forrageira, têm-se uma menor variação da produção de biomassa geral da propriedade (Figura 17).

Figura 16 - Biomassa de forragem para os diferentes modelos de uso e ocupação da Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE, considerando a eficiência do uso da forragem (EUF): Pasto natural (50%), Capim-buffel (60%), Massai (70%), Palma (90%)

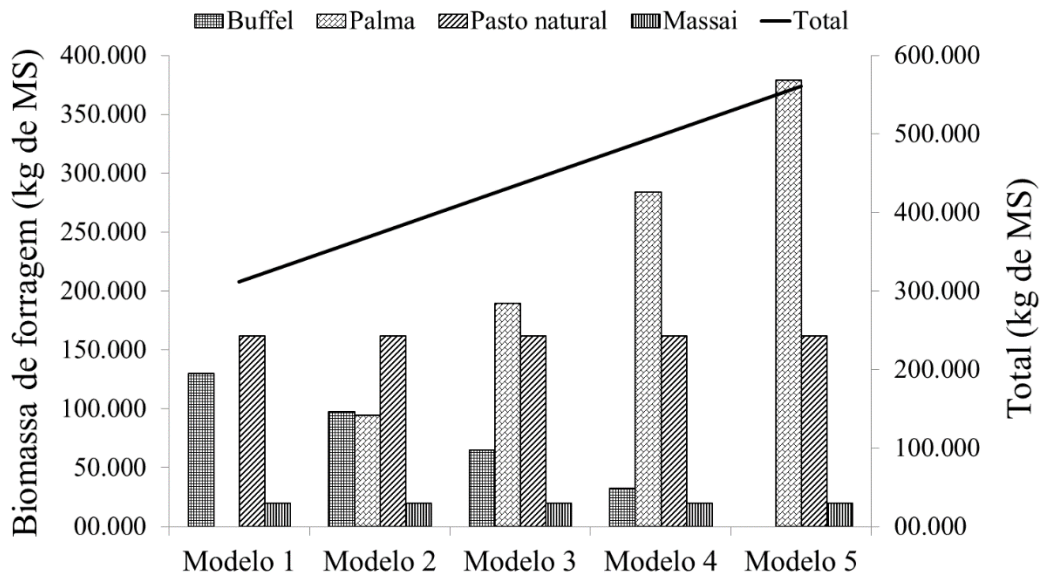
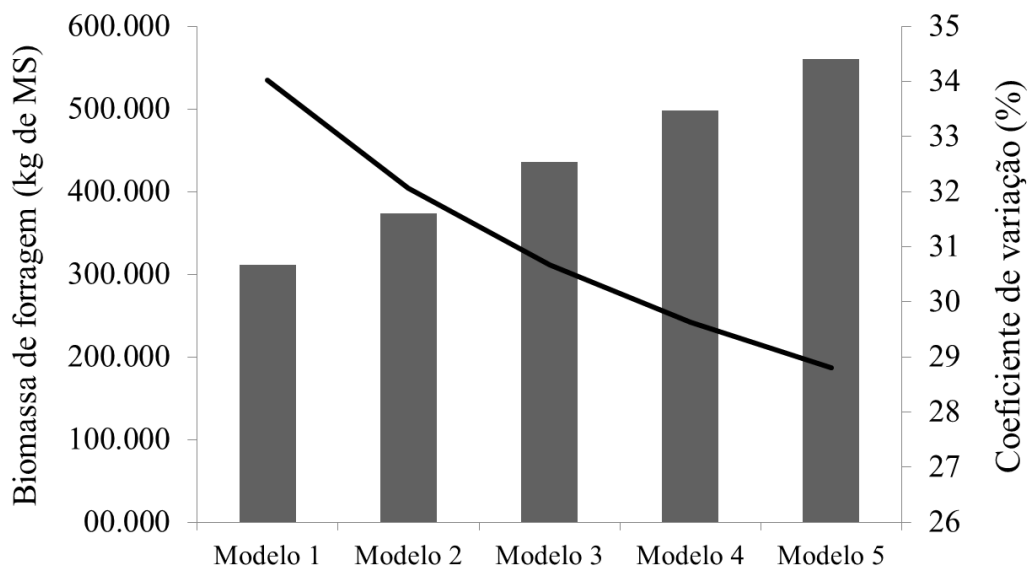


Figura 17 - Biomassa de forragem e coeficiente de variação dos modelos de uso e ocupação da propriedade, simulados para a fazenda Remédio, Quixeramobim-CE



Nas condições deste estudo, a palma forrageira mostra-se como o pilar de sustentação do sistema de garantia. Diferentemente do que foi observado para as outras forrageiras cultivadas e pasto natural, em que houve maiores variações dos dados, ou seja, maiores

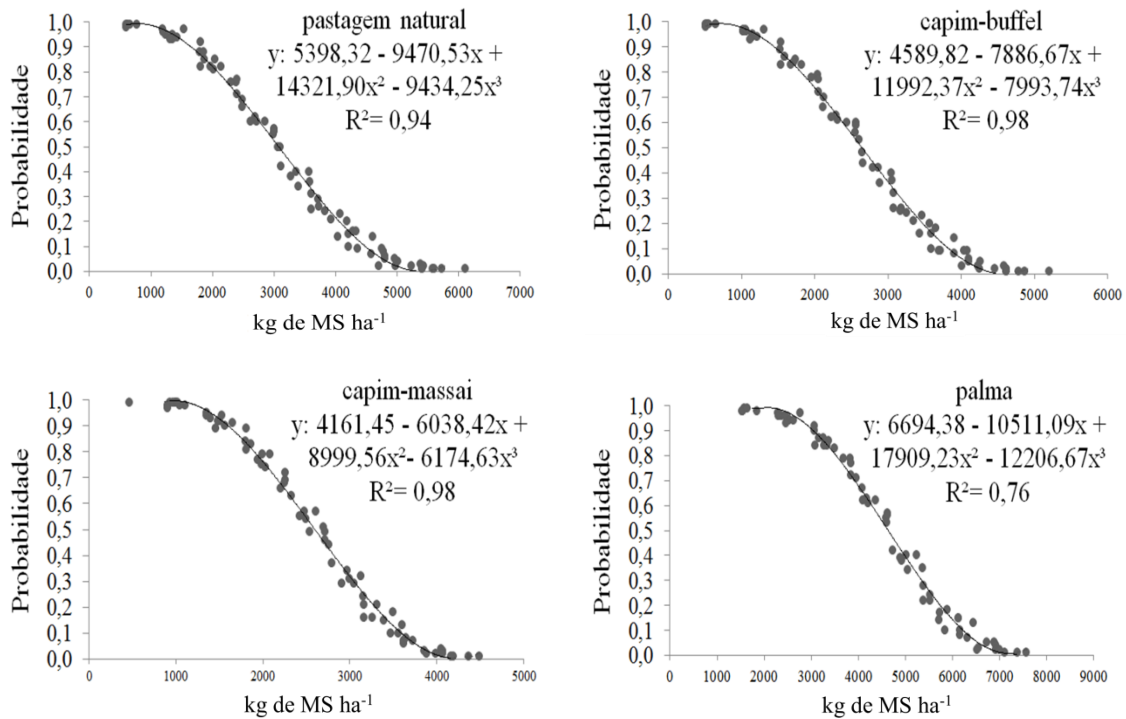
distâncias entre os picos de máximo e mínimo na série sintética de dados diária (modelo primário do PHYGROW), a palma forrageira tem a maioria dos valores em torno da média. Em outras palavras, a palma forrageira se comporta como um estoque, onde as perdas de água e matéria seca são menores e repostos a cada estação de crescimento, mantendo a biomassa estabilizada. Essa característica é fundamental para ajudar no tamponamento dos sistemas dependentes de *inputs* aleatórios como a precipitação.

Por outro lado, um sistema pecuário baseado em apenas um recurso forrageiro suplementar ao pasto natural, pode invariavelmente estar sujeito a problemas com pragas e doenças, entre outras perturbações, que podem afetar a estabilidade da produção de forragem. Estes eventos devem ser ponderados e incluídos no planejamento do sistema. No modelo 03 (Figura 16), a título de exemplo, verifica-se um maior equilíbrio entre as fontes de alimentação da propriedade que, embora tenha um volume menor de forragem se equiparado ao modelo 05 (Figura 16), pode este trazer maior resiliência ao sistema pela diversidade dos seus constituintes. Em outra análise, a presença em grande volume de palma forrageira na propriedade exige maior mão de obra para colheita e arração dos animais, elevando os custos de produção.

Quando os modelos de crescimento dos recursos forrageiros são agora avaliados pelo conceito de garantia natural (SILVA et al, 2013), é verificado uma produtividade mínima de 1.000 kg de MS ha⁻¹ para a Fazenda Remédio (Figura 18). De maneira genérica, estes resultados significam que, nas hipóteses climáticas mais limitantes, é garantido com 95% de certeza que a propriedade alvo deste estudo poderá contar com pelo menos 1.000 kg de MS ha⁻¹.

Apesar da pequena área de aluviões (Neossolos) da propriedade destinada ao uso pelo capim-massai, verifica-se uma produtividade estimada em 9.649 kg de MS em 11 ha, com uma garantia de 95%, o que suportaria uma carga animal estimada de 1,9 UA's ao ano. As áreas de baixio das propriedades são estratégicas dentro de um sistema pecuário de sequeiro, por serem aquelas mais propensas a se manterem úmidas por mais tempo ao longo do ano, elevando a garantia do crescimento vegetal.

Figura 18 - Garantias naturais de produção de biomassa da pastagem natural (derivado do modelo de crescimento em Sobral, Ceará (MORAES, 2021)), do capim-buffel, capim-massai e palma forrageira (derivado do modelo de crescimento em Limoeiro do Norte-CE) para a Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE



A área da propriedade propensa à agricultura de sequeiro, simulada com o cultivo do capim-buffel, tem o potencial de produção de 52.366 kg de MS em 81,8 ha (garantia de 95%), comportando uma capacidade de suporte animal estimada de 10,7 UA's. Ao passo que, se a mesma área fosse cultivada totalmente com palma forrageira, a produção seria estimada em 177.147 kg de MS, elevando a capacidade de suporte para 36,4 UA's, com a mesma garantia de 95%.

A área de pasto natural utilizada sob uma EUF de 50% tem potencial estimado em 64.940 kg de MS em 104,9 ha, suficiente para manutenção de um rebanho de 13,4 UA's ao ano. Todavia, é importante destacar que o modelo de pasto natural obtido no *software* PHYGROW foi parametrizado para simulação de uma composição florística heterogênea formada por dois grandes grupos funcionais (gramíneas e dicotiledôneas herbáceas) e o bamburral (*Hyptis sp.*), este último contribuindo de forma muito expressiva no total da biomassa amostrada.

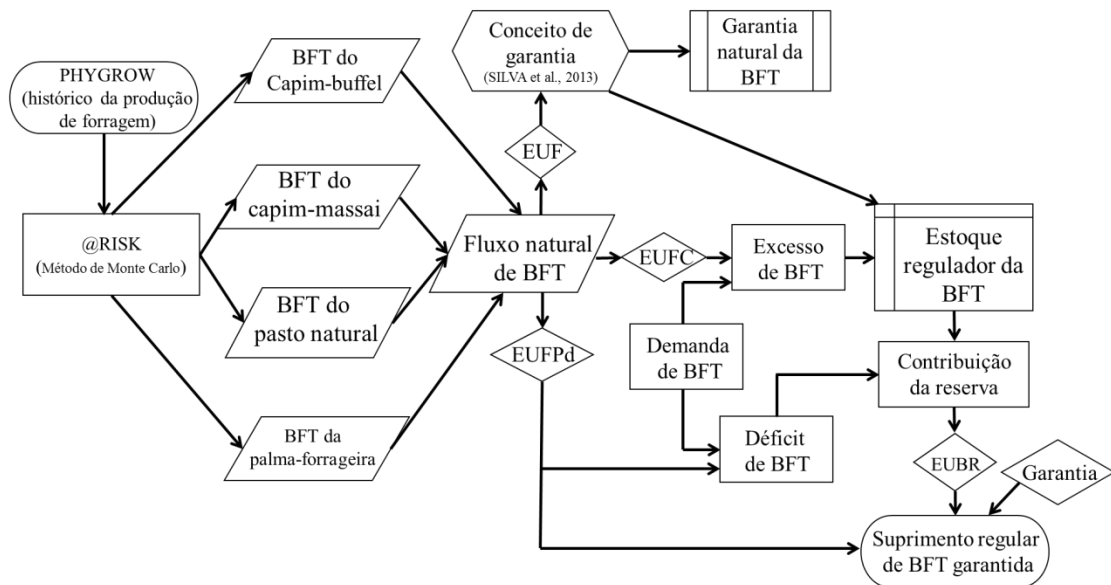
O bamburral é uma espécie espontânea e bastante presente nos diferentes tipos vegetacionais da Caatinga, sendo rejeitado pelos animais (ARAÚJO FILHO, 2013), assim como algumas dicotiledôneas herbáceas, o que é suposto uma biomassa total do pasto natural superestimado do ponto de vista de oferta alimentar para os rebanhos. A área definida para uso como pastagem natural foi selecionada pelas características do relevo, impedindo a entrada de maquinário agrícola, como ondulações e presença de afloramentos rochosos típico dos luvisolos.

As análises acima representam a produtividade natural da propriedade de forma categorizada no zoneamento, onde os resultados representam uma maior segurança alimentar para os rebanhos ao utilizar uma garantia mínima de produção vegetal. Neste primeiro momento, temos uma evolução da oferta de forragem para os animais, que através da garantia há a possibilidade de planejar o sistema para um maior prazo, algo diferente das abordagens tradicionais, em que a estimativa da produção de forragem no Semiárido brasileiro é empírica e muitas vezes baseada no que foi produzido no ano anterior.

Dentre os recursos forrageiros avaliados, o pasto natural é o elemento mais inconstante do sistema de produção, mesmo com a máxima garantia estipulada. Apesar da sistemática colheita de dados ao longo da estação de crescimento e no pico do acúmulo de forragem (MORAES, 2021), a elevada heterogeneidade do componente herbáceo e o caráter efêmero de algumas espécies de reconhecido valor forrageiro pode fugir a capacidade de predição do modelo de crescimento. Em anos com baixo regime de chuvas é comum encontrar abundância de gramíneas de ciclo rápido, e o inverso é verdadeiro para anos com maiores precipitações. Assim, esta variação florística estacional, aliada as diferentes “caatingas” e graus de antropização, pode provocar a falsa ideia de oferta de forragem passível de consumo pelos animais.

Nesse sentido, em razão da problematização envolta da produção de biomassa pelas pastagens naturais, é apresentado a seguir um diagrama da reestruturação ou incremento do modelo elaborado por Cândido et al. (2021) para as pastagens naturais, agora com a inclusão de reconhecidas forrageiras (capim-buffel, capim-massai e palma forrageira) para o cultivo em regime de sequeiro (Figura 19).

Figura 19 - Reestruturação do Sistema de Garantia de Forragem Estabilizada



Fonte: Adaptado de Cândido et al. (2021). Nota: BFT (Biomassa de Forragem Total); EUF (Eficiência do Uso da Forragem); EUFC (Eficiência do Uso da Forragem Colhível); EUFPd (Eficiência do Uso da Forragem sob Pastejo direto); EUBR (Eficiência do Uso da Biomassa da Reserva).

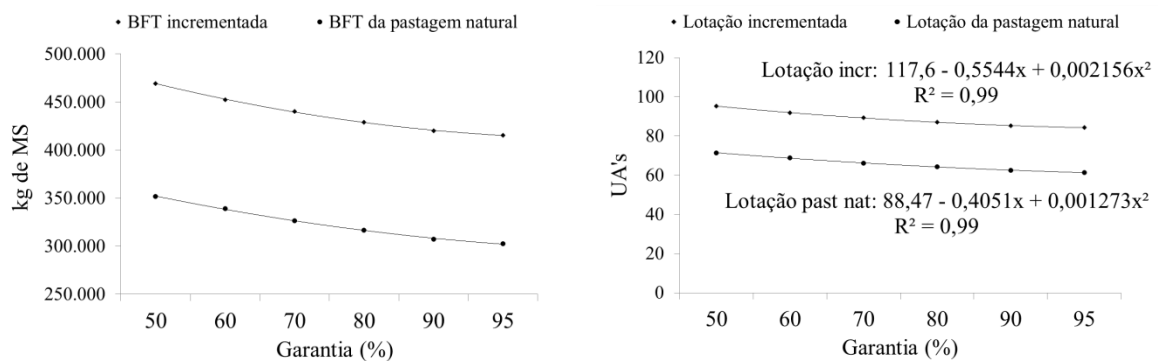
O Sistema Asa Branca se propõe a melhorar a oferta de forragem regularizada e garantida através da gestão eficiente dos excedentes de biomassa de forragem total das culturas, incluindo a pastagem natural. O *estoque regulador de BFT* é a chave do sistema, onde a *contribuição da reserva* é acionada para tamponar aqueles anos onde a forragem produzida é insuficiente. O *suprimento regular de BFT garantida*, o produto final do sistema, pode ser alterado a qualquer momento em função da garantia almejada.

Como aplicação do sistema propriamente dito e demonstração dos ganhos pelo uso da técnica, foram simuladas duas situações: primeira, a propriedade contando com todas as áreas (Tabela 5) potenciais produtoras de forragem ocupadas com pastagem natural e segunda, a propriedade ocupada com os arranjos das culturas no Modelo 03, apresentado no Quadro 01.

O potencial de produção de forragem da Fazenda Remédio (garantia de 95%) pelo incremento das culturas foi estimado em 113.103 kg de MS (Figura 20, esquerda), o que suportaria uma carga animal acrescida em 23,3 UA's ao ano (Figura 20, direita). Traduzindo esses valores em área cultivada com capim-buffel, tomando como exemplo a produtividade da forrageira obtida para a propriedade, seria o equivalente a ter uma área nova de 176,7 ha com uma biomassa de forragem disponível, descontada a EUF, de aproximadamente 640 kg de MS ha⁻¹.

Estes ganhos de produtividade podem ser acrescidos mediante a diminuição da garantia. Esta decisão caberá ao produtor, que pode dispor de novas áreas próprias, áreas para arrendamento ou recursos forrageiros capazes de suprir uma eventual demanda. Uma vez contabilizada e garantida a produção da propriedade, o risco de perdas passa a ser contabilizado, saindo da condição de empirismo natural da produção de forragem em regime de sequeiro no Semiárido brasileiro.

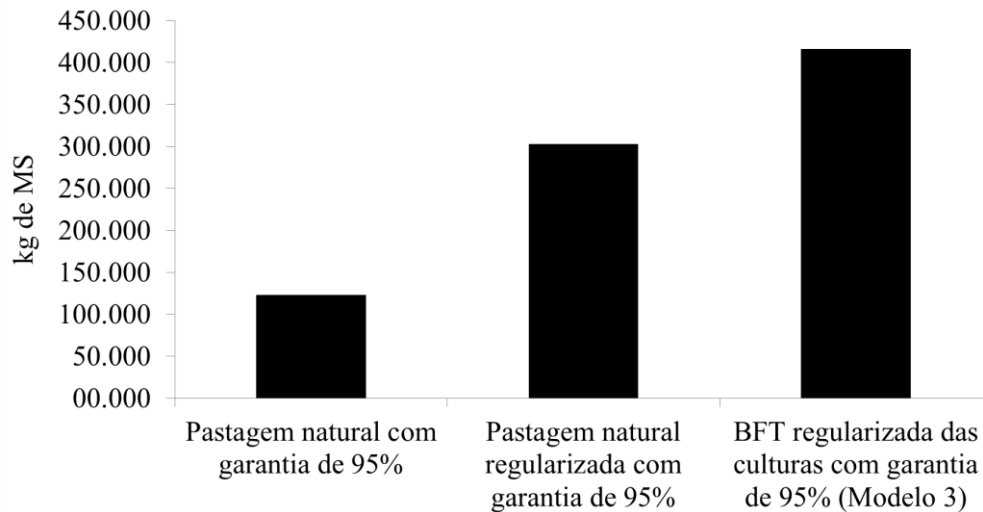
Figura 20 - Biomassa de forragem total incrementada (Modelo 03) e da pastagem natural (esquerda) e taxas de lotação incrementada (Modelo 03) e da pastagem natural (direita) simuladas para a Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE



A produção de forragem nas condições de Semiárido, além de se apresentar com potencial de produção limitada (condição ecológica natural), esta é associada a grande incerteza de sua ocorrência, sendo o principal entrave para os sistemas de produção. Nesse sentido, aplicando-se os conceitos propostos de garantia, saiu-se da condição de incerteza, passando a conviver sob a ótica do risco. E este, passível de ser mensurado, visto nas técnicas apresentadas.

Na Figura 21, coluna da esquerda, é visto que no nível mais simples da aplicação do conceito de garantia natural, houve a possibilidade de definição de qual biomassa (122.390 kg de MS) poder-se-ia contabilizar no planejamento, com uma garantia de 95%. Tal condição por si só eleva a segurança dos sistemas de produção que se propõem a se estabelecer neste ambiente.

Figura 21 - Garantias (95%) da pastagem natural (coluna esquerda), da pastagem natural regularizada (coluna central) e biomassa de forragem total (BFT) das culturas (Modelo 03) (coluna direita), aplicada a Fazenda Remédio, Quixeramobim-CE



Todavia, esta garantia, por não dispor de mecanismos de tamponamento da produção, frente à variação natural do ambiente, apresenta-se limitante quanto ao potencial total de produção da propriedade. Nesse sentido, a evolução proposta na Figura 21, coluna central, conta com o advento do uso do *Estoque regulador de BFT*, conduzido mediante a aplicação dos conceitos de garantia, no qual possibilita o incremento de produtividade do sistema, com a mínima certeza de sucesso e possibilidade pela gestão do risco associados à produção.

No último cenário (Figura 21, coluna da direita), vê-se a possibilidade de elevação da produção de biomassa da unidade de produção em aproximadamente 73% em relação a pastagem natural (coluna da esquerda), com o advento do incremento via introdução de outras culturas. Dessa forma, é demonstrado ser possível a intensificação dos sistemas de produção de ruminantes, dependentes de chuva, no ambiente Semiárido, com elevado grau de sucesso.

Em resumo, foi demonstrada por meio da modelagem mecanicista e estocástica, a possibilidade de simular o crescimento vegetal, conjecturando alternativas de incremento da produção em sistemas dependentes de variáveis probabilísticas. As vantagens do Sistema Asa Branca proposto neste estudo vão além da quantificação da produção vegetal. Por meio das técnicas apresentadas, é possível simular os sistemas de produção de forma ágil e segura para locais onde não se tem conhecimento de dados de campo e climáticos. Ao nível de propriedade, representa uma segurança ao produtor, saindo da condição de total empirismo e

oferecendo a chance de incrementar a oferta de forragem para os rebanhos. No médio e longo prazo, oferece segurança para a mitigação dos efeitos das secas, que tanto prejuízo traz aos habitantes das regiões semiáridas.

2.4 Conclusão

O uso de técnicas de modelagem estocástica, associada à análise de probabilidade, é importante para contribuir na estimativa do crescimento vegetal de culturas forrageiras e da pastagem natural (Caatinga), associada a certo nível de garantia.

Por meio do Sistema Asa Branca, proposto neste estudo, é possível analisar o incremento da produção de forragem da pastagem natural pelo cultivo de forrageiras adaptadas, garantidas por um sistema capaz de tamponar os anos com déficit de produção.

As simulações realizadas na Fazenda Remédio mostram o potencial de incremento de aproximadamente 73% (equivalente a 293.000 kg de MS) pelo uso de culturas forrageiras em relação à ocupação exclusiva das áreas com pastagem natural.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. P. *et al.* Produção animal no bioma caatinga: Paradigmas dos ' Pulsos-Reservas'. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 1, p. 138-155, 2006.
- ANGERER, Jay P. **Examination of high resolution rainfall products and satellite greenness indices for estimating patch and landscape forage biomass**. 2010. 142 p. Tese de Doutorado. Texas A & M University.
- ARAÚJO FILHO, João A. **Manejo Pastoril Sustentável da Caatinga**. Projeto Dom Helder Câmara. Recife, 2013. 200 p.
- ARAUJO FILHO, J. A.; VALE, L. V.; SANTOS, J. W. Níveis de adubação em estrato herbáceo nativo no sertão cearense. In: **Embrapa Caprinos e Ovinos-Resumo em anais de congresso (ALICE)**. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 25., 1988, Viçosa, MG. Anais... Viçosa: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1988. p. 170., 1988.
- BARBOSA, Danilo H. *et al.* A gestão de mudanças na logística: estudo exploratório em empresas do setor de bens de capital agrícolas. **Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 14, n. 1, p. 136, 2019.
- BARIONI, L. G.; VELOSO, R. F.; MARTHA JÚNIOR, G. B. Modelos matemáticos aplicados a sistemas de produção animal em pastagens. **SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM**, v. 1, p. 235-278, 2002.
- BOTREL, M. de A.; NOVAES, Luciano P.; ALVIM, Maurílio J. Características forrageiras de algumas gramíneas tropicais. **Embrapa Gado de Leite-Documents (INFOTECA-E)**, 1998. 35 p.
- CÂNDIDO, Magno José D. *et al.* Forage-Balance Guarantee System: defining forage storage capacity to stabilize livestock production in vulnerable ecosystems. **Agricultural Systems**. 2021 (submetido).
- CEARÁ. **Ceará em Mapas - IPECE 2020** - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/>. Acesso em: 15 set. 2020.
- CHECKLAND, Peter. **Systems thinking, systems practice**. Chinchester: John Wiley & Sons, 1989. 330p.
- GASPARINI, Liz Vanessa L. *et al.* **Sistemas integrados de produção agropecuária e inovação em gestão: Estudos de casos no Mato Grosso**. Texto para Discussão, 2017. 43 p.
- HOLECHEK, Jerry L. An approach for setting the stocking rate. **Rangelands**, v. 10, n. 1, p. 10-14. 1988.
- HONKALASKAR, Vijay Hanmant; D BAGDE, Nikhilesh; B KEDARE, Shireesh. Understanding Agrarian crisis: A participatory and qualitative systemic analysis. **Journal of Agricultural Studies**, v. 6, n. 1, p. 260-297, 2017

IBGE/SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censoagropecuario/censoagropecuario2017>. Acesso em: 04 jan. 2021.

KÖPPEN, W. Das Geographische System der Klimate, Vol. 1., Part C. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Handbuch der Klimatologie**. Gebruder Borntraeger, Berlin, 1936. p. 1-44

KWAK, Sang G.; KIM, Jong H. Central limit theorem: the cornerstone of modern statistics. **Korean journal of anesthesiology**, v. 70, n. 2, p. 144, 2017.

LEGATES, David R.; MCCABE JR, Gregory J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water resources research**, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LIMA JÚNIOR, Edmilson R. **Uso de ferramentas de agricultura de precisão para o planejamento de uma propriedade no semiárido do sertão central do Ceará**. 2014. 50 f. (Monografia em Agronomia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.

LIMA, José R.; MAGALHÃES, Antonio R. Secas no Nordeste: registros históricos das catástrofes econômicas e humanas do século 16 ao século 21. **Parcerias Estratégicas**, v. 23, n. 46, p. 191-212, 2019.

MARANHÃO, Samuel R. *et al.* Morfofisiologia do capim-buffel cultivado sob diferentes suprimentos hídricos na estação seca e estação seca chuvosa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 8, p. 566-571, 2019.

MARANHÃO, Samuel R. *et al.* Morphophysiology of tropical grasses under different water supply in two growing seasons: II. BRS Massai and BRS Tamani grasses. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 301-318, 2021.

MARQUES, Flávio A. *et al.* Solos do nordeste. **Embrapa Solos-Fôlder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)**, 2014.

MENESES, Valdênio F. “Saudade e rusticidade”: a convivência com o semiárido entre grandes pecuaristas do Nordeste. **Sociologias**, v. 22, n. 55, p. 354-380, 2020.

MIYAMOTO, Koichi; SHIOHARA, Kenji. Reduction of qubits in a quantum algorithm for Monte Carlo simulation by a pseudo-random-number generator. **Physical Review A**, v. 102, n. 2, p. 022424, 2020.

NOBEL, Park S. **Environmental biology of agaves and cacti**. Cambridge University Press, 2003.

OLIVEIRA, Martiniano C.; SILVA, CMM de S.; DE SOUZA, Francisco B. **Capim buffel (Cenchrus ciliaris L.) preservação ex-situ e avaliação aprofundada**. In: QUEIROZ, MA de; GOEDERT, CO; RAMOS, SRR (Ed.). Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o Nordeste brasileiro. Petrolina: Embrapa Semi-Árido; Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 1999.

PALISADE CORPORATION. **The DecisionTools Suite 8.0.0**. New York, 2020.

POMPEU, Roberto Cláudio Fernandes. F. *et al.* Desempenho agronômico de *Megathyrus maximus* cultivares Massai e Tamani sob diferentes regimes hídricos em duas estações (seca e chuvosa). **Embrapa Caprinos e Ovinos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2018. 32 p.

POMPEU, Roberto Cláudio Fernandes F. *et al.* Desempenho agronômico de capim-búffel cultivar gayndah sob diferentes regimes hídricos em duas estações (seca e chuvosa). **Embrapa Caprinos e Ovinos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2018. 23 p.

SANTOS, Humberto G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 355 p.

SILVA, Rodrigo. G. *et al.* Orçamentação Forrageira de Longo Prazo no Semiárido. **Revista Científica de Produção Animal**, v. 15, n. 2, p. 98-110, 2013.

STUTH, J. W. *et al.* PHYGROW users guide and technical documentation. **Department of Rangeland Ecology and Management: Texas A&M University**, 2003. 79 p.

SUN, Hongxia; WAN, Yao; LV, Huirong. System Dynamics Model for the Evolutionary Behaviour of Government Enterprises and Consumers in China's New Energy Vehicle Market. **Sustainability**, v. 12, n. 4, p. 1578, 2020.

WILLMOTT, Cort J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

3 CAPÍTULO II: ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE SUPORTE DO CAPIM-BUFFEL E CAPIM-CORRENTE SOB O CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

RESUMO

Neste estudo foram realizadas simulações no *software* PHYWEB, versão virtual do PHYGROW (*Phytomass Growth Model*) para avaliar os possíveis impactos futuros das mudanças climáticas na capacidade de suporte das gramíneas capim-buffel (*Pennisetum ciliare*) e capim-corrente (*Urochloa mosambicensis*), por meio dos modelos climáticos globais CNRM-CM3, MIROC5 e MRI-CGCM3, considerando o cenário RCP 4.5 (*Representative Concentration Pathways - 4.5*). Como preparo do cenário, foi considerado o intervalo futuro de 38 anos (2037-2075) para o município de Limoeiro do Norte-CE, mais precisamente na região da Chapada do Apodi. Após calibração e validação do modelo de crescimento das culturas, os dados foram projetados para estimativa das mudanças climáticas pelos modelos climáticos globais, com o auxílio do *software* PHYGROW. Verificou-se adequada correlação entre os modelos climáticos CNRM-CM3, MIROC5 e MRI-CGCM3 e o modelo inicial de crescimento das culturas pelo PHYGROW. Os cenários apresentados para as duas forrageiras avaliadas são positivos, indicando uma capacidade de suporte estimada em 1,5 a 2,5 UA ha⁻¹ e estabilizada longo do período simulado.

Palavras-chave: gramíneas forrageiras tropicais; modelagem; modelos globais; taxa de lotação animal

3 ESTIMATED CARRYING CAPACITY OF BUFFEL GRASS AND CORRENTE GRASS UNDER THE CLIMATE CHANGE SCENARIO

ABSTRACT

In this study, simulations were performed without PHYWEB *software*, virtual version of PHYGROW (*Phytomass Growth Model*) to assess the possible future impacts of climate change on the carrying capacity of buffel grass (*Pennisetum ciliare*) and corrente grass (*Urochloa mosambicensis*), through global climate models CNRM-CM3, MIROC5 e MRI-CGCM3, considering the scenario RCP 4.5 (*Representative Concentration Pathways - 4.5*). To prepare the scenario, the future interval of 38 years (2037-2075) was considered for the municipality of Limoeiro do Norte-CE, more precisely in the region of the plateau of Apodi. After calibration and validation of the crop growth model, the data were designed to estimate climate change using global climate models, with the aid of the PHYGROW *software*. There was an adequate correlation between the climate models CNRM-CM3, MIROC5 and MRI-CGCM3 and the initial model of crop growth by PHYGROW. The scenarios presented for the two evaluated forages are positive, indicating a support capacity estimated at 1.5 to 2.5 AU ha⁻¹ and stabilized over the simulated period.

Keywords: Animal stocking rate. Global models. Modeling. Tropical forage grasses.

3.1 Introdução

A produtividade das plantas forrageiras tropicais é função das condições edafoclimáticas e do manejo adotado, sobretudo da carga animal aplicada. Mudanças climáticas e ambientais nas últimas décadas reduziram a produção de inúmeras culturas agrícolas, com maior impacto nas regiões secas do planeta (DERESSA; HASSAN 2009; SRIDHARAN et al., 2019). Estima-se que a produtividade das culturas continue a diminuir no século XXI devido ao aumento da concentração de dióxido de carbono, da diminuição da disponibilidade hídrica e das condições climáticas adversas (PORTER et al. 2014), contudo, carecem de informações mais precisas sobre as perdas e projeções futuras da produção vegetal para alimentar os rebanhos.

O clima é regido por diversos agentes climáticos, naturais e/ou antropogênicos, que podem contribuir para aquecer o planeta. Em uma situação ideal, seria conveniente para o modelador analisar o impacto de dadas ações para diminuir tais efeitos ou, pelo menos, buscar soluções alternativas para uma eventual conjuntura provocada. Atualmente, esta possibilidade está cada vez mais próxima, por meio dos modelos climáticos cada vez mais avançados e consistentes para previsões de mudanças climáticas, sendo atualizados com estimativas confiáveis das forçantes radiativas. A forçante radiativa pode ser explicada como um agente que tende a aquecer ou resfriar o planeta ($W m^{-2}$) (LEVIS et al., 2018) e permite prever a magnitude do impacto sobre o clima, para algum local ou região do globo. Os cenários de mudanças climáticas consideram os *Representative Concentration Pathways* (RCP's) como parâmetro da modelagem climática (IPCC, 2013). De início, foram sugeridos em um número de quatro, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 e RCP 8.5 e são assim denominados a partir dos níveis das forçantes radiativas. Em resumo, como medida mais dura, o RCP 2.6 compreende a adoções de severas medidas de contenção da emissão de dióxido de carbono; enquanto que o cenário RCP 4.5, dito intermediário, pondera a imposição de emissões de poluentes e de políticas públicas de mitigação dos efeitos de mudanças climáticas; e o RCP 8.5 supõe a emissão constante de CO^2 ao longo do século 21.

A vegetação da Caatinga sofreu intensamente pelo uso insustentável dos seus recursos naturais, como a extração vegetal e a carga animal elevada. Atualmente, as propriedades daquela região estão reduzidas e incapazes de manter maiores rebanhos, o que elevaria ainda mais a pressão de pastejo. A introdução de culturas forrageiras adaptadas a regimes de sequeiro, como o capim-buffel (*Pennisetum ciliare*) e capim-corrente (*Urochloa mosambicensis* (Hack.) Daudy), foi a muito tempo inserida (SILVA et al., 1987; OLIVEIRA

et al., 1988), esquecida, e agora retorna com entusiasmo como alternativa pertinente para o incremento da vegetação natural castigada. Porém, com os cenários climáticos futuros incertos, requerem maior atenção para o impacto destas mudanças na produtividade vegetal das culturas a longo prazo.

Nesse sentido, buscou-se por meio deste estudo, avaliar a capacidade de suporte de duas gramíneas forrageiras tropicais, capim-buffel e capim-corrente, sob o efeito das mudanças climáticas futuras, considerando o cenário RCP 4.5.

3.2 Material e Métodos

Para a representação estimada da produtividade (kg de MS ha⁻¹) do capim-buffel e capim-corrente (Figuras 26 e 27; Apêndice A) no município de Limoeiro do Norte (região da Chapada do Apodi), Ceará (05°10'53" S e 38°00'43" W), utilizou-se o *software* PHYWEB, versão virtual do *software* PHYGROW (STUTH, 2003). Os modelos de estimativa de crescimento vegetal das duas forrageiras são considerados validados por critérios estatísticos (WILLMOTT, 1982; LEGATES et al., 1999; ANGERER, 2010) (Tabela 8).

Tabela 8 - Estatística para avaliação da capacidade do modelo PHYGROW de simular o crescimento vegetal do capim-buffel e capim-corrente em Limoeiro do Norte-CE

Estatística	Capim-buffel	Capim-corrente
Médias observadas (kg MS ha ⁻¹)	5.495,0	4.887,7
Médias Estimadas (kg MS ha ⁻¹)	5.704,3	4.955,0
Desvio padrão (kg MS ha ⁻¹) [€]	1.750,7	1.392,9
Desvio padrão (kg MS ha ⁻¹) [¥]	542,5	368,5
Erro padrão (kg MS ha ⁻¹) [€]	424,6	402,0
Erro padrão (kg MS ha ⁻¹) [¥]	131,5	106,3
Erro médio absoluto (kg MS ha ⁻¹)	118,5	178,9
Erro quadrado médio da raiz (kg MS ha ⁻¹)	488,9	619,8
Erro médio da previsão (%)	3,8	1,4
Eficiência da estimativa	0,3	0,2
Índice de concordância	0,4	0,3
<i>N</i>	20	15

Nota: kg MS ha⁻¹ (quilograma de matéria seca por hectare); *N* (número de amostras); € (dados observados); ¥ (dados estimados).

De posse dos dados históricos estimados das duas culturas, ainda no *software* PHYGROW, foram realizadas as simulações para as mudanças climáticas futuras utilizando de modelos climáticos globais disponíveis no programa. Foram selecionados três modelos globais oceânico-atmosféricos que fazem parte do *Coupled Model Intercomparison Project 5* (CMIP5), modelos que servem de subsídio para a elaboração dos relatórios de mudanças climáticas do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (Tabela 9). Os modelos contemplam as concentrações observadas dos gases do efeito estufa no decorrer do século XX para uma projeção estimada da concentração destes gases para o século XXI (ROGELJ et al. 2012).

Tabela 9 - Modelos de circulação globais oceânicos-atmosféricos (MGCOA), componentes auxiliares do IPCC

Modelo	Centro	Tipo de MGC	Resolução horizontal*	Níveis Verticais
CNRM-CM5	França	MGCOA	1.4°/1.4°	31
MIROC5	Japão	MGCOA	1.4°/1.4°	56
MRI-CGCM3	Japão	MGCOA	1.125°/1.125°	48

Nota: MGCOA (Modelo Global de Circulação Oceânico-Atmosférico). *Latitude e Longitude.

Neste estudo foi considerado o cenário RCP 4.5 (FORSTER et al., 2007; IPCC, 2013) como parâmetro da modelagem climática durante um cenário futuro de 38 anos (2037-2075). Neste cenário, pondera-se o clima esperado se as mudanças climáticas forem implementadas adequadamente, com a perspectiva de que a concentração de CO₂ na atmosfera atinja valores de 650 ppm (LEVIS et al., 2018). Em outras palavras, preza uma expressiva diminuição da demanda energética mundial e fortes políticas públicas de conservação das florestas e políticas climáticas ainda mais duras.

A avaliação da capacidade de suporte (Equação; Adaptada de Holechek, 1988) será dada pelo conceito de UA ha⁻¹ ano⁻¹ (bovino adulto, em estado de manutenção, pesando 450 kg de peso vivo, mantido em um hectare durante o período determinado). No estudo foi suposta uma eficiência no uso da forragem de 60%. O consumo diário de forragem preconizado na ordem de 2,1% do peso vivo (SANTANA et al., 2010) e período de permanência na pastagem de 180 dias.

Eq.:

$$\text{Capacidade de suporte: } \frac{QFD * EUFD}{CDF * CFP}$$

Onde:

Capacidade de suporte: unidade animal (UA) por hectare, por período;

QFD: quantidade de forragem disponível (kg de MS ha⁻¹);

EUFD: eficiência do uso da forragem disponível (%);

CDF: consumo de diário de forragem (kg de MS UA⁻¹ dia⁻¹);

CFP: consumo de forragem por período (Kg de MS UA⁻¹ período⁻¹).

As séries sintéticas de dados obtidas dos modelos foram submetidas à análise de regressão e correlação, com auxílio do *software* estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011) e avaliação da frequência de distribuição dos valores simulados. Para avaliação da capacidade de suporte, os dados foram agrupados em intervalos anuais para identificação do pico da capacidade de suporte, o que coincide com o máximo acúmulo de forragem da estação de crescimento correspondente.

3.3 Resultados e discussão

O prognóstico da produtividade do capim-buffel e capim-corrente pelos modelos CNRM-CM5, MIROC5 e MRI-CGCM3, ponderando o cenário RCP 4.5 mostrou-se otimista (Figuras 28 e 29; Apêndice A). Estes resultados são esperados, logo que o RCP 4.5 é um cenário que estabiliza a forçante radiativa a 4,5 Watts m⁻² no ano de 2100 (THOMSON et al., 2011; CUBASCH et al., 2013; LEVIS et al., 2018).

Os modelos apresentaram acertada correlação, evidenciando maior segurança nas estimativas, o que ressalta o potencial uso dos modelos climáticos globais no cômputo da produtividade vegetal futura (Tabela 10). A princípio, uma adequada parametrização do modelo de estimativa do crescimento vegetal é fundamental para obtenção do modelo validado e diminuir o erro da estimativa futura. Este erro está fortemente relacionado à escolha errada do modelo global, culminando em realização de projeções futuras com menor grau de incerteza (CATTO et al., 2013).

Tabela 10 - Correlação entre os modelos climáticos CNRM-CM5, MIROC5 e MRI-CGCM3 (projeções futuras) e o modelo PHYGROW (série sintética progressa) para a estimativa de crescimento vegetal do capim-buffel e capim-corrente em Limoeiro do Norte-CE

Modelo	PHYGROW	CNRM-CM5	MIROC5	MRI-CGCM3
PHYGROW	1	0,84	0,79	0,84
CNRM-CM5	0,89	1	0,80	0,88
MIROC5	0,86	0,86	1	0,80
MRI-CGCM3	0,91	0,92	0,87	1

Ao analisar a frequência dos dados das séries sintética progressa pelo PHYGROW e projeção futura pelos modelos climáticos CNRM-CM5, MIROC5 e MRI-CGCM3, para o capim-buffel (Figura 22) e capim-corrente (Figura 23), verifica-se grande similaridade na produtividade das gramíneas, tendo as maiores produções concentradas nos valores entre 4000 e 6000 kg de MS ha⁻¹. As maiores produtividades observadas são função do pico de produção das culturas na estação de crescimento.

É importante destacar novamente que a produtividade das gramíneas verificada neste estudo é inerente as características edafoclimáticas do sítio ecológico, logo que, do ponto de vista da acurácia do modelo, a estimativa não generalista permite ao modelador maior confiança nos resultados alcançados. Durante a parametrização, o modelo PHYGROW considera o local exato (coordenadas geográficas) onde foram colhidas as amostras vegetais, incluindo dados precisos de solo e da planta. Tal objetividade pode levar a produtividades distintas de outros locais.

Novamente, em relação ao impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade, a tendência mostrada pelos modelos climáticos é de estabilidade (linhas de tendência, Figuras 22 e 23), porém com pequeno declínio para o capim-corrente de aproximadamente 890 kg de MS ha⁻¹ em 2075, em relação ao ano inicial da simulação (2037); e de 1100 kg de MS ha⁻¹ se levado em conta o cenário mais pessimista disposto pelo modelo CNRM-CM3.

Figura 22 - Análise de frequência e regressão dos modelos PHYGROW (série sintética progressa) e modelos climáticos CNRM-CM5, MIROC5 e MRI-CGCM3 (projeções futuras) para o capim-buffel no município de Limoeiro do Norte-CE, conforme o cenário RCP 4.5

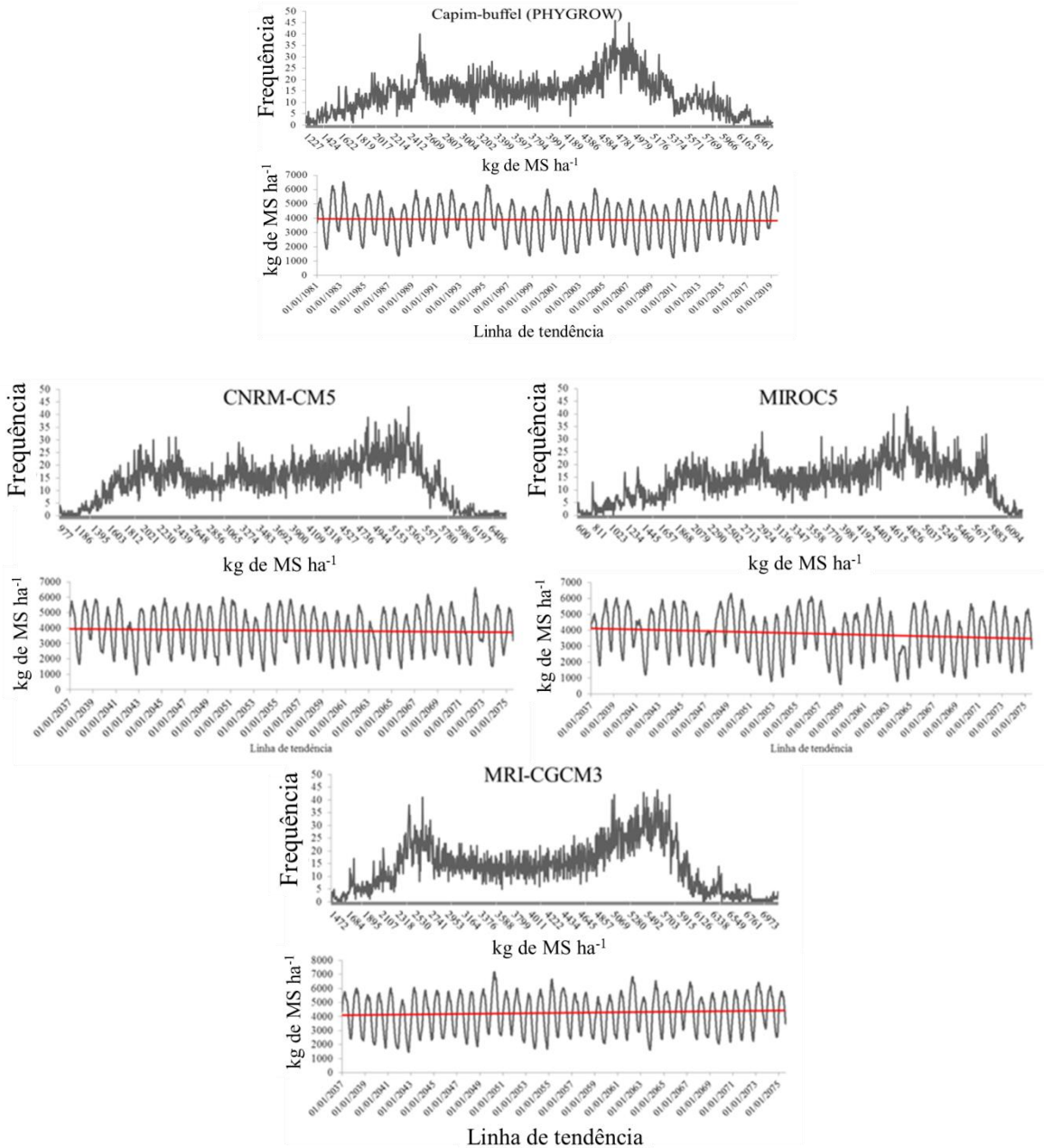
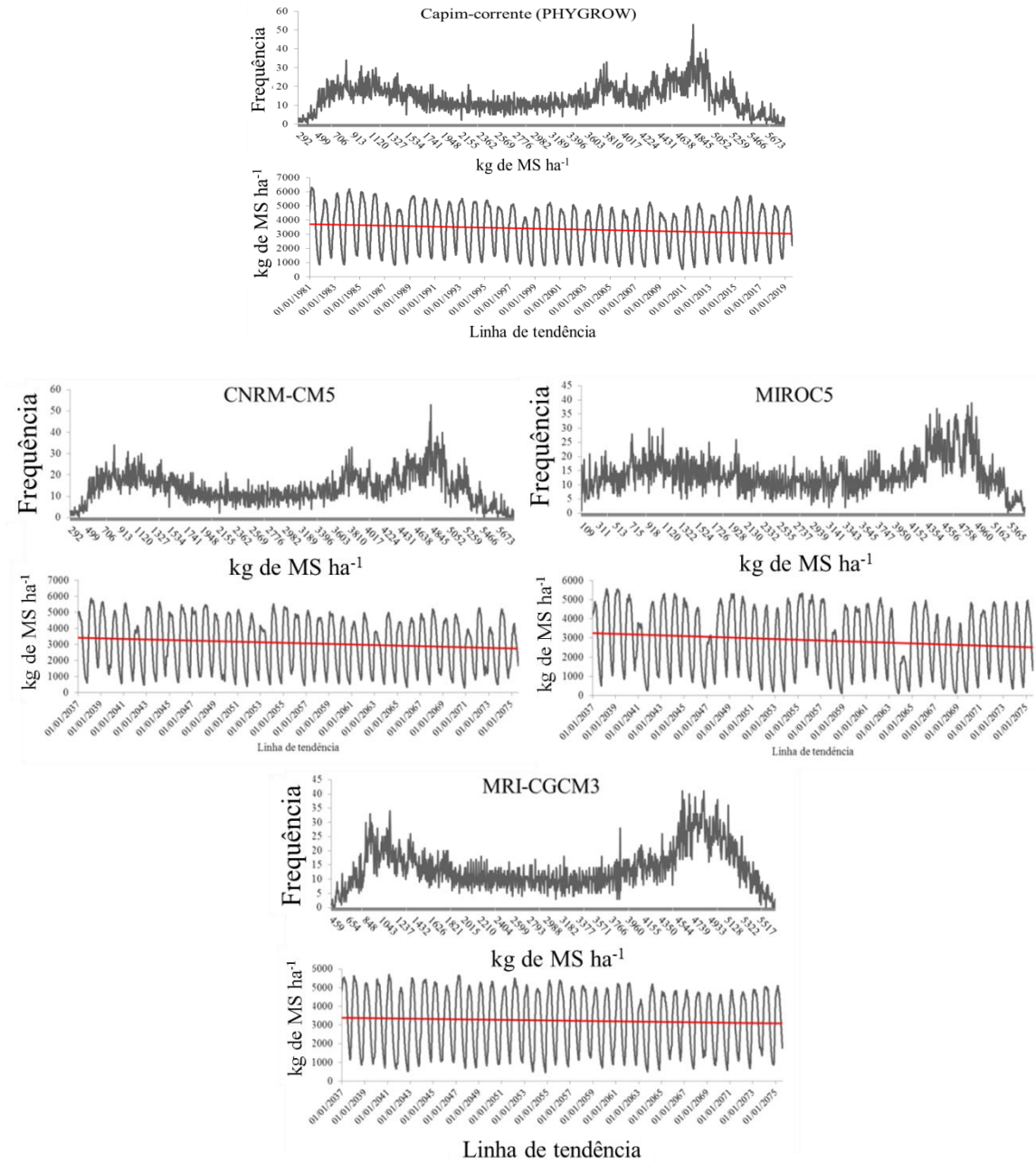


Figura 23 - Análise de frequência e regressão dos modelos PHYGROW (série sintética progressa) e modelos climáticos CNRM-CM5, MIROC5 e MRI-CGCM3 (projeções futuras) para o capim-corrente no município de Limoeiro do Norte-CE, conforme o cenário RCP 4.5



Com referência à capacidade de suporte estimada pelos modelos climáticos, pressupondo o pico da produtividade das culturas na estação de crescimento, verificou-se uma carga oscilando entre 1,5 e 2,2 UA ha⁻¹ (Figuras 24 e 25). Apenas para o modelo MIROC5 observa-se maior flutuação da capacidade de suporte para ambas forrageiras, com uma queda acentuada no ano de 2064, aferindo 1,05 e 0,64 UA ha⁻¹ para o capim-buffel e capim-corrente, respectivamente.

Figura 24 - Capacidade de suporte (UA ha⁻¹) estimada pelos modelos PHYGROW (série sintética progressa) e modelos climáticos CNRM-CM5, MIROC5 e MRI-CGCM3 (projeções futuras de 38 anos) para o capim-buffel no município de Limoeiro do Norte- Ce, conforme o cenário RCP 4.5

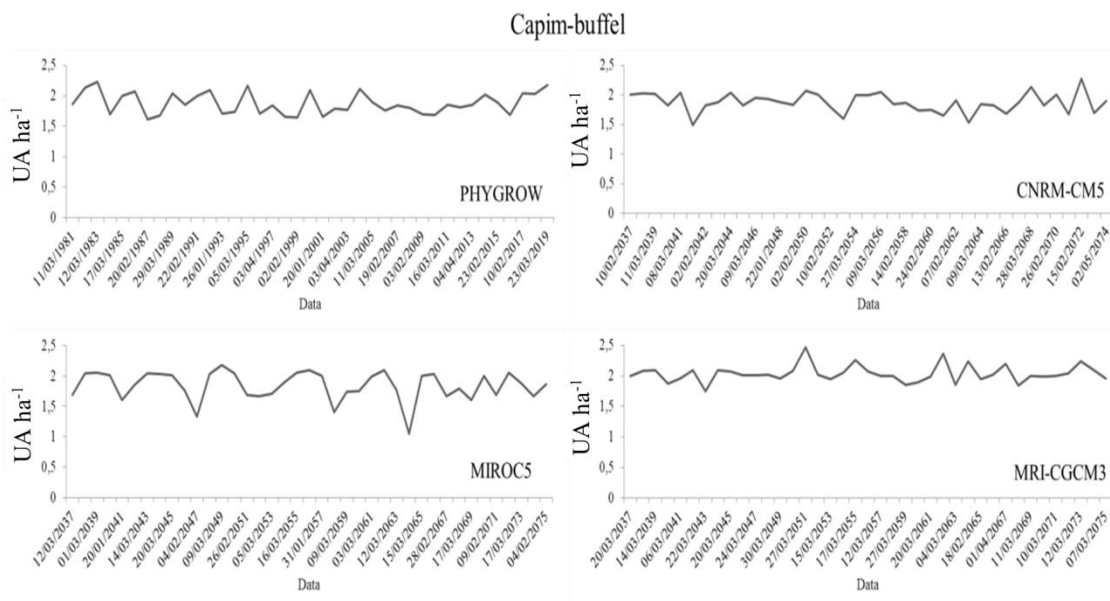
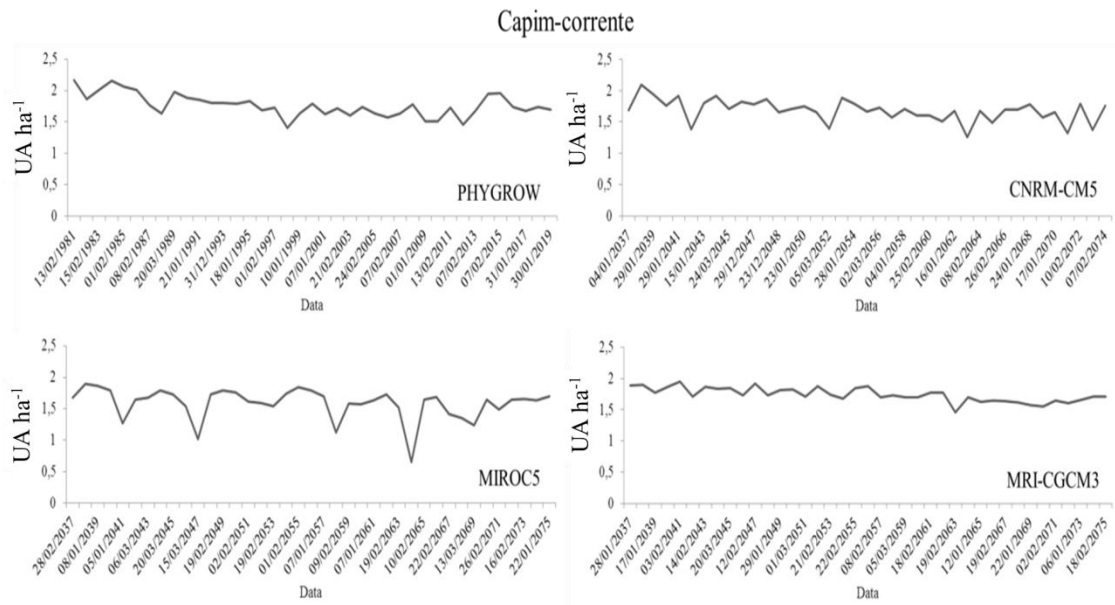


Figura 25 - Capacidade de suporte (UA ha⁻¹) estimada pelos modelos PHYGROW (série sintética progressa) e modelos climáticos CNRM-CM5, MIROC5 e MRI-CGCM3 (projeções futuras de 38 anos) para o capim-corrente no município de Limoeiro do Norte-CE, conforme o cenário RCP 4.5



Os cenários apresentados para as duas forrageiras avaliadas são positivos, sobretudo se levado em conta a baixa capacidade de suporte das pastagens naturais do Semiárido Brasileiro, vegetação da caatinga, que oscila em torno de 0,1 UA ha⁻¹ (ARAÚJO FILHO et al., 2013). A produção de forragem na região é potencialmente incrementada com o cultivo de espécies exóticas adaptadas, como o capim-buffel e capim-corrente, com produtividades variando entre 4000 ± 1,500 kg de MS ha⁻¹ (SILVA et al., 1987; OLIVEIRA et al., 1988; MOREIRA et al., 2007; MOURA et al., 2017).

A capacidade de suporte estimada neste trabalho (1,5 a 2,2 UA ha⁻¹) foi superior àquela encontrada em estudos pioneiros com estas forrageiras: 0,7 a 0,9 UA ha⁻¹ para capim-corrente e 0,97 ± 0,28 UA ha⁻¹ para o capim-buffel (LYRA et al., 1987; OLIVEIRA et al., 1988). É salutar ressaltar novamente que o prognóstico apresentado pelo cenário RCP 4.5 é condição ímpar para o local onde foram extraídos os dados que alimentaram o modelo de predição (PHYGROW).

A produtividade observada em Limoeiro do Norte, mais precisamente na Chapada do Apodi, reflete as características de clima e, sobretudo, do solo da região. O solo em questão, da classe dos Cambissolos (SANTOS, 2018), apresenta elevada fertilidade natural e é passível

de mecanização, o que ajuda a explicar a maior produção de biomassa das forrageiras neste estudo.

Aliado as condições supracitadas, foi considerado apenas o cenário RCP 4.5, cenário que supõe estabilização, ou seja, assume a imposição de emissões e de políticas públicas de mitigação dos efeitos de mudanças climáticas, diferindo dos RCP's 8.5; 6.0 e 2.6. O cenário RCP 4.5 foi adotado neste estudo inicial por se aproximar do que se denomina *mundo tangível* no clima atual e ser importante para os tomadores de decisão CAYA et al., 2009).

Em virtude do grau de acurácia das estimativas apresentadas, é possível conjecturar o elevado potencial de utilização do capim-buffel e do capim-corrente para o incremento da capacidade de suporte das pastagens do Semiárido Brasileiro. Todavia, a exploração de dados de outras condições edafoclimáticas é condição fundamental para abordar a elevada heterogeneidade das paisagens encontrada naquele ambiente.

Em contrapartida, a partir deste estudo introdutório, fica a perspectiva de mapear as unidades ambientais do mosaico de solos e condições socioambientais encontrado na região nordeste do Brasil e, em conjunto, simular os efeitos das mudanças mais abruptas do clima considerando cenários mais pessimistas. Dados desta natureza são importantes para o diagnóstico e preparo das políticas públicas para mitigar os possíveis efeitos das mudanças climáticas na pecuária brasileira.

3.4 Conclusão

O cenário de mudanças climáticas RCP 4.5 indica tendência de estabilidade da capacidade da capacidade de suporte do capim-buffel e capim-corrente, oscilando entre 1,5 e 2,2 UA ha⁻¹, ao longo de uma expectativa para o período futuro de 2037 a 2075.

REFERÊNCIAS

- ANGERER, Jay P. **Examination of high resolution rainfall products and satellite greenness indices for estimating patch and landscape forage biomass**. 2010. 142 p. Tese de Doutorado. Texas A & M University.
- CATTO, Jennifer L.; JAKOB, Christian; NICHOLLS, Neville. A global evaluation of fronts and precipitation in the ACCESS model. **Australian Meteorological and Oceanographic Society Journal**, v. 63, p. 191-203, 2013.
- CAYA, Daniel *et al.* Evaluating and Improving Regional Climate Projections. **WCRP Informal Report**, n. 5, 2009. 22 p.
- CUBASCH, U. *et al.* Introduction. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, p. 119-158, 2013.
- DERESSA, Temesgen T.; HASSAN, Rashid M. Economic impact of climate change on crop production in Ethiopia: Evidence from cross-section measures. **Journal of African economies**, v. 18, n. 4, p. 529-554, 2009.
- FERREIRA, Daniel F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- FORSTER, Piers *et al.* Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2. In: **Climate Change 2007. The Physical Science Basis**. 2007. 106 p.
- HOLECHEK, Jerry L. An approach for setting the stocking rate. **Rangelands**, v. 10, n. 1, p. 10-14. 1988.
- IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York, p. 19, 2013.
- LEGATES, David R.; MCCABE JR, Gregory J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water resources research**, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.
- LEVIS, Samuel *et al.* CLMcrop yields and water requirements: avoided impacts by choosing RCP 4.5 over 8.5. **Climatic Change**, v. 146, n. 3, p. 501-515, 2018.
- LIRA, M. de A. *et al.* Utilização do pasto nativo e cultivado em recria e engorda de bovinos no semi-árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 16, n. 3, p. 267-274, 1987.
- MOREIRA, José N. *et al.* Potencial de produção de capim búffel na época seca no semi-árido pernambucano. **Revista Caatinga**, v. 20, n. 3, p. 20-27, 2007.

MOURA, Geovane A. *et al.* Acúmulo de fitomassa de capim-corrente em função da adubação fosfatada e nitrogenada. In: **II Congresso Internacional das Ciências Agrárias (COINTER-PDVagro)**, 2017.

OLIVEIRA, M. C. *et al.* Comportamento de gramíneas forrageiras sob condições de pastejo intensivo por bovinos na região semi-árida do Nordeste do Brasil. **EMBRAPA-CPATSA. Documentos 56**, 1988. 15 p.

ROGELJ, Joeri; MEINSHAUSEN, Malte; KNUTTI, Reto. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. **Nature climate change**, v. 2, n. 4, p. 248-253, 2012.

SANTANA, Daniel F. Y. *et al.* Dry matter intake and performance of Girolando and Guzerá heifers and Guzerá under supplementation in caatinga, during the rainy season, in Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 10, p. 2148-2154, 2010.

SANTOS, Humberto G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 355 p.

SILVA, Célia M. M. S.; DE OLIVEIRA, Martiniano C.; SEVERINO, G. Avaliação da produtividade de treze cultivares de capim buffel, na região semi-árida de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 22, n. 5, p. 513-520, 1987.

SRIDHARAN, Vignesh *et al.* The impact of climate change on crop production in Uganda—an integrated systems assessment with water and energy implications. **Water**, v. 11, n. 9, p. 1805, 2019.

STUTH, J. W. *et al.* PHYGROW users guide and technical documentation. **Department of Rangeland Ecology and Management: Texas A&M University**, 2003. 79 p.

THOMSON, Allison M. *et al.* RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic change**, v. 109, n. 1, p. 77-94, 2011.

WILLMOTT, Cort J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

4 CAPÍTULO III: MODELAGEM DO BALANÇO HÍDRICO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE RUMINANTES NO SEMIÁRIDO

RESUMO

Objetivou-se demonstrar o impacto do consumo de água de um sistema de produção de ruminantes na pequena açudagem em ambiente semiárido, em um cenário de 30 anos. O modelo de sistema de produção escolhido para estudo compreende uma propriedade rural hipotética localizada em Petrolina-PE. Para construção do modelo, a série histórica anual de precipitação de Petrolina foi submetida ao teste de aderência no *software* @RISK[®] para identificação da função densidade de probabilidade. O modelo de fluxo de água do sistema foi elaborado no *software* Vensim PLE[™]. O modelo considera o reservatório como ponto central de fluxo de água do sistema. A capacidade máxima do pequeno reservatório, as taxas de evaporação, infiltração e de escoamento foram estimadas em resultados da literatura para região do Semiárido brasileiro. Foi considerada no modelo a irrigação de um palmal (*Opuntia stricta*), o consumo de água humano e de serviço da propriedade e o consumo de água anual por caprinos, ovinos e bovinos estimados pela literatura. Foram realizadas três simulações: estimativa do volume máximo do reservatório (1) e consumo de água em diferentes cenários de produção de caprinos e ovinos (2) e bovinos (3). Na simulação 01, em razão do pouco volume de chuvas, em apenas 05 dos 30 anos foi atingida a máxima capacidade do reservatório. No que se referem as simulações 02 e 03, à medida que a irrigação é considerada e a exigência hídrica dos animais aumenta, são verificados anos onde o açude de $\approx 7.000 \text{ m}^3$ seca completamente, inviabilizando a irrigação e a criação de bovinos nos cenários mais exigentes. Este trabalho buscou explorar indicadores práticos, por meio da modelagem e Dinâmica de Sistemas, para auxiliar a tomada de decisão na gerência da água da propriedade, sobretudo para a estimativa do balanço hídrico e da água necessária para os rebanhos.

Palavras-chave: Dinâmica de Sistemas. Pequeno açude. Simulação estocástica. Sistema de produção animal.

4 MODELING THE WATER BALANCE OF A RUMINANT PRODUCTION SYSTEM IN THE SEMI-ARID

ABSTRACT

The objective was to demonstrate the impact of water consumption from a ruminant production system in the small reservoir in a semi-arid environment, in a scenario of 30 years. The production system model chosen for the study comprises a hypothetical rural property located in Petrolina-PE. For the construction of the model, the annual historical series of precipitation of Petrolina was subjected to the adhesion test in the *software* @RISK[®] to identify the probability density function. The system's water flow model was developed using the Vensim PLE[™] *software*. The model considers the reservoir as the central point of water flow in the system. The maximum capacity of the small reservoir, the evaporation, infiltration and flow rates were estimated in the literature results for the Brazilian Semi-Arid region. It was considered in the model the irrigation of a cactus pear (*Opuntia stricta*), the consumption of human and service water on the property and the annual water consumption by goats, sheep and cattle estimated by the literature. Three simulations were carried out: estimation of the maximum volume of the reservoir (1) and water consumption in different scenarios of production of goats and sheep (2) and cattle (3). In simulation 01, due to the low volume of rainfall, in only 05 of the 30 years the maximum capacity of the reservoir was reached. Regarding simulations 02 and 03, as irrigation is considered and the water requirement of the animals increases, there are years when the de 7,000 m³ weir dries completely, making irrigation and cattle breeding unfeasible in the most demanding scenarios. This work sought to explore practical indicators, through modeling and Systems Dynamics, to assist decision making in the management of the property's water, especially for the estimation of the water balance and the water needed by the herds.

Keywords: Animal production system. Small weir. Stochastic simulation. Systems Dynamics.

4.1 Introdução

De todos os recursos naturais, a água é sem dúvida o elemento que está relacionado a todos os “passos” da humanidade, desde a primitiva necessidade de dessedentação, passando para o desenvolvimento agrícola e industrial atuais. As civilizações tiveram seu desenvolvimento às margens de corpos d’água, a exemplo de registros dos povos Sumérios (4000 a.C. aproximadamente) que detinham de instruções sobre a irrigação de lavouras; e dos egípcios que dispunham de tecnologias de controle do nível da água à montante e à jusante do rio Nilo (RODRIGUES, 1998).

Em contraste à cobertura de 70% da superfície terrestre por água, apenas 3% é doce, sendo 29% desse volume acessível, assim distribuídos: 18% são as águas subterrâneas, 7% estão em rios e lagos e cerca de 4% sob a forma de vapor d’água. Do volume de água acessível, 8% vão para o consumo humano e 70% são utilizados na agricultura (RIBEIRO, 2008; OECD, 2010), com boa parte direcionada para a produção de grãos e forragem para arração animal (OPIO et al., 2011). O montante de água supracitado que é destinado para a agricultura é necessário, porém ainda é de difícil compreensão para a sociedade que a produção de alimentos requer água.

Nas zonas áridas e semiáridas do planeta, que compreendem aproximadamente 17,7% do planeta (ROTENBERG e YAKIR, 2010), a agricultura e a pecuária de sequeiro dependem apenas da precipitação. Dessa forma, a atividade agropecuária nesse sentido comporta-se como a vegetação natural e não causa efeito sensível no volume de água acessível que poderia ser destinado a consumo humano, por exemplo. A água pode apresentar-se em diferentes compartimentos dentro do sistema, como o solo, a vegetação e o próprio animal, sobretudo em nível de propriedade, onde se torna singular a tal compartimentação.

Por meio da modelagem estocástica e dinâmica de sistemas é possível elaborar um diagrama do fluxo de água na propriedade, permitindo vislumbrar a melhor forma de gerenciar este recurso, determinando a quantidade de água futura a ser necessária a dado prazo de tempo. Nesse sentido, o presente estudo caracteriza-se como uma tentativa de melhorar a gestão da água e entender seus caminhos dentro dos sistemas de produção pecuários.

Portanto, objetivou-se desenvolver um modelo de fluxo hídrico na produção pecuária, associado à possibilidades de realizar simulações, ou seja, criar cenários para auxiliar na tomada de decisão.

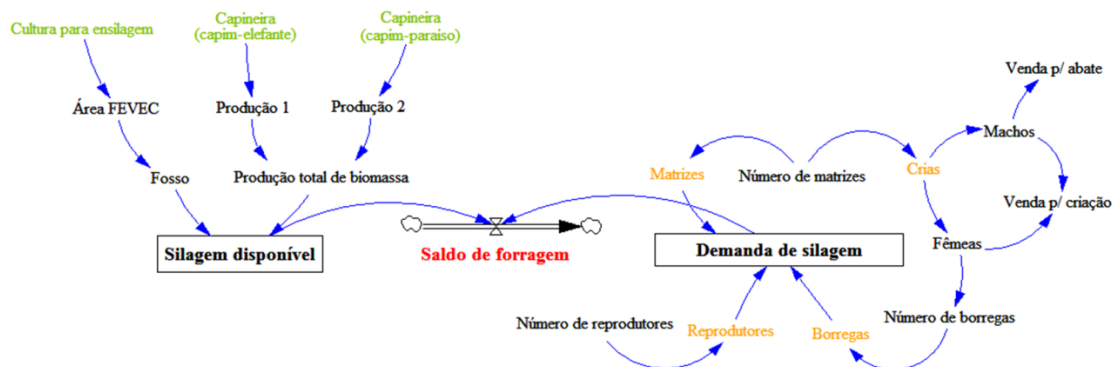
4.2 Material e métodos

4.2.1 Modelo de uso/fluxo de água em sistemas de produção animal no Semiárido brasileiro

O modelo aqui proposto aborda a Dinâmica de Sistemas como forma de compreensão dos elementos envolvidos na dinâmica da água em um sistema de produção pecuário situado na região semiárida brasileira. A Dinâmica de Sistemas permite “pôr no papel” os “mapas mentais” de cada segmento da propriedade, auxiliando na construção de modelos que auxiliem na compressão do todo e na tomada de decisão.

Como ferramenta de apoio para a construção do modelo foi escolhido o *software* Vensim PLE™ (Ventana Systems Inc., 2010), por ser de interface acessível e possuidora de elementos gráficos que evidenciam de forma clara os eventos do sistema em simulação (Figura 26).

Figura 26 - Exemplo de modelo desenvolvido no *software* Vensim PLE™



Fonte: Elaborada pelo autor.

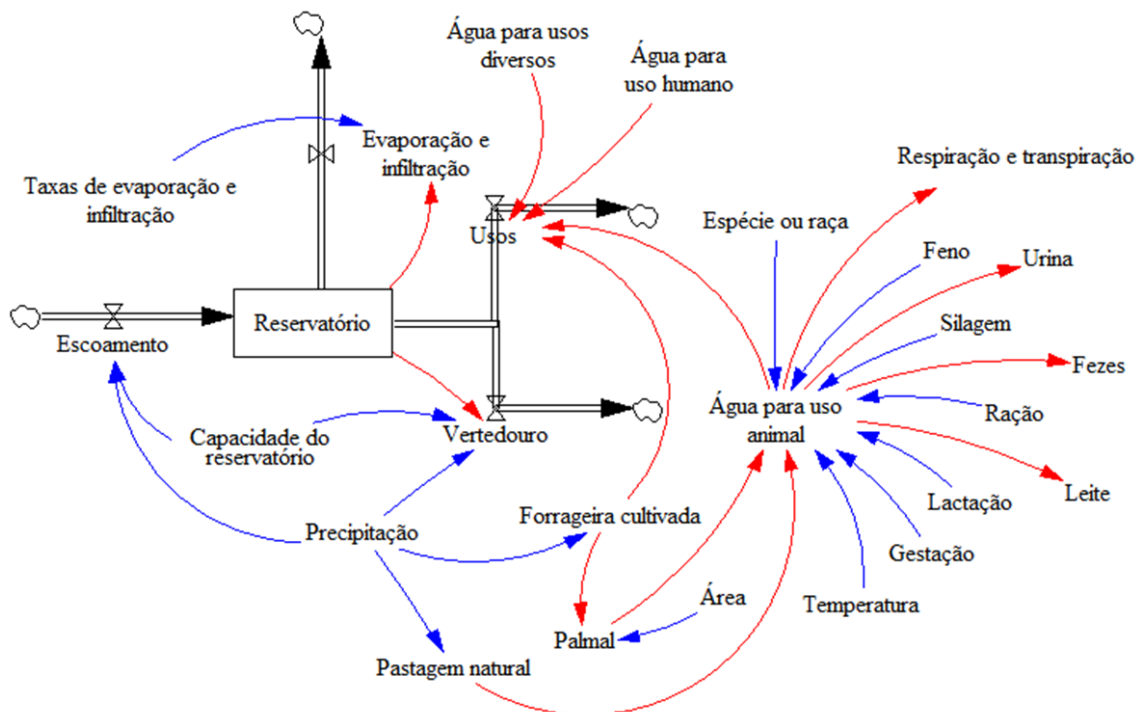
4.2.2 Construção do modelo

O modelo de sistema de produção escolhido para estudo compreende uma propriedade rural hipotética localizada em Petrolina (Latitude 09° 23' S e Longitude 40° 30' O), Pernambuco, Brasil. O clima da região é classificado como Bshw (KÖPPEN, 1936) com baixa pluviosidade média anual (435 mm), altas taxas de evapotranspiração potencial (1.521 mm) e expressivo déficit hídrico ao longo do ano (JATOBÁ et al., 2017).

De início, é importante identificar a variável primeira que será o centro do processo de modelagem, tendo as demais variáveis interligadas para criar uma estrutura lógica. É importante ainda destacar que o entendimento do sistema em estudo vai além da percepção dos processos envolvidos, engloba todas as ações ao decorrer do tempo e suas ações de retorno.

A variável primeira do modelo de simulação será o reservatório hídrico (Figura 27). A escolha desta se deu em razão de ser peça chave no armazenamento da principal entrada de água no sistema (precipitação) na grande maioria das propriedades. Ademais, a açudagem de pequeno porte é comum no sertão nordestino, pelo baixo custo de construção, facilidade de acesso à pequena propriedade, além de ser a maior fonte de aproveitamento da água da chuva pelos cursos de água intermitentes (ASSUNÇÃO e LIVIGSTONE, 1993; CAMPOS, 2009).

Figura 27 - Diagrama do fluxo de água de um sistema de produção pecuário hipotético em ambiente semiárido. As setas em azul e vermelho representam entradas e saídas da água do sistema, respectivamente

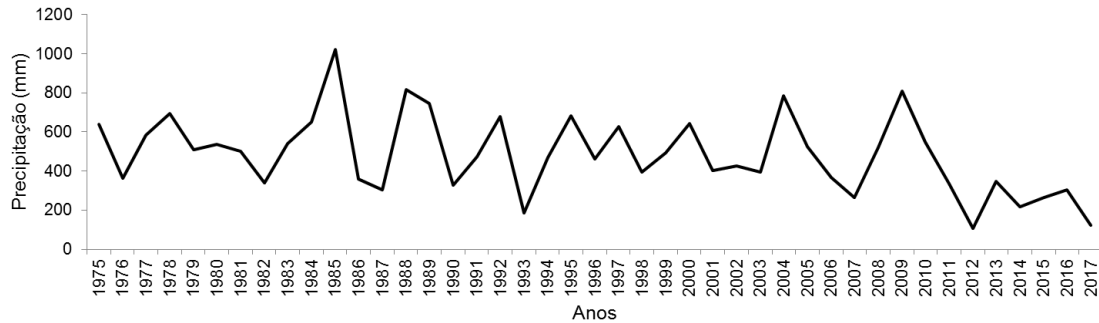


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a estimativa da precipitação, foi levantado o histórico do cômputo das chuvas a cada ano para a cidade de Petrolina-PE (Figura 28) para posterior determinação da função densidade de probabilidade da variável. Após análise no *software* @RISK[®] verificou-se na função *Weibull* aquela que melhor descreve o comportamento da precipitação para Petrolina

(Figura 29). Levando em conta o caráter quase aleatório da chuva no Semiárido brasileiro (ANDRADE et al., 2006), foi utilizada a função *RANDOM Weibull* no *software* Vensim PLE™ para melhorar a capacidade de predição do modelo (Figura 30).

Figura 28 - Histórico de precipitação do município de Petrolina-PE



. Fonte: EMBRAPA, 2020.

Figura 29 - Ajuste da função tipo *Weibull* para o comportamento da precipitação em Petrolina-PE

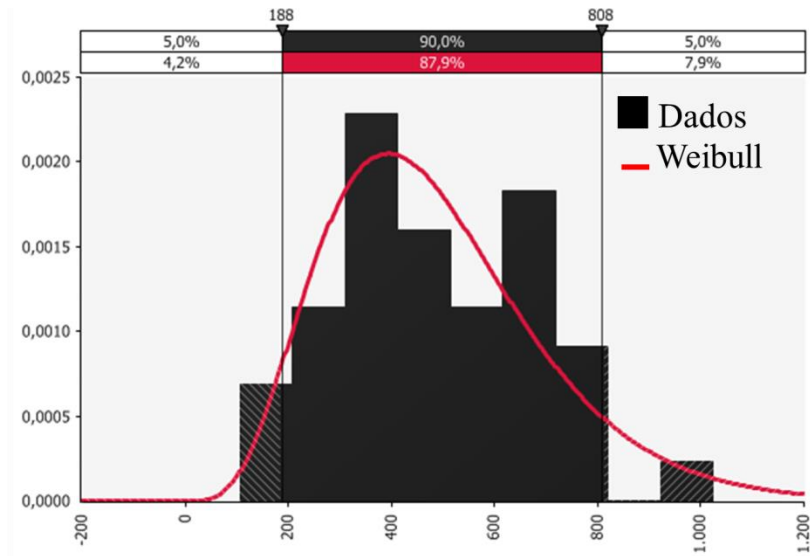
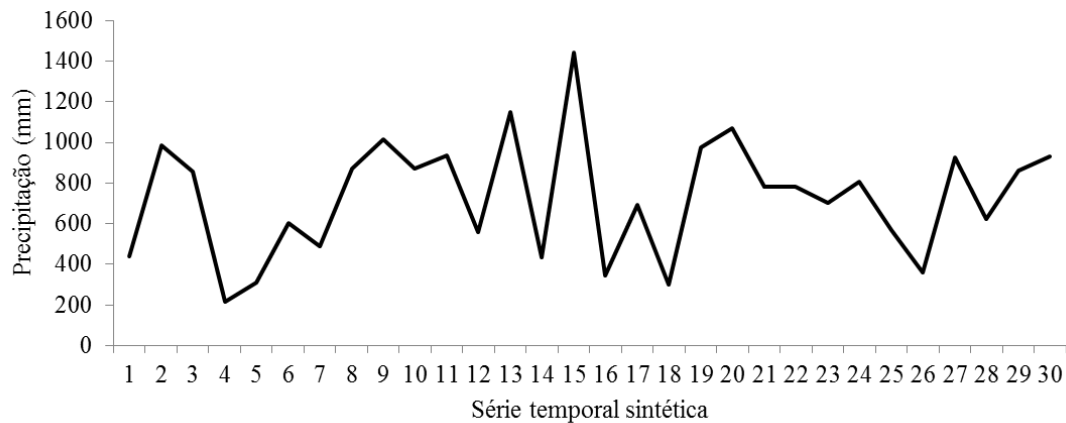


Figura 30 - Simulação da precipitação (função *Weibull*) para o município de Petrolina-PE considerando um cenário de 30 anos



O volume do reservatório, ou seja, a capacidade máxima de armazenamento do açude, dada em m³, é estimada pela equação (MOLLE e CADIER, 1992):

Eq.:

$$Volume\ do\ reservatório = \frac{H * S}{2,7}$$

Onde:

H = altura do açude (m);

S = superfície do espelho de água (m²);

2,70 = forma média dos açudes.

Na impossibilidade de mensuração do rebaixamento do açude, ou seja, obter informações das taxas de evaporação e de infiltração pode-se adotar cálculos aproximados. Para reservatórios de menor porte (profundidade inferior a 5 m), pode-se considerar uma perda de 10 a 12 mm dia⁻¹ no período seco, enquanto que, para reservatórios com espelho d'água superior a 10 hectares, as perdas podem chegar de 7 a 9 mm dia⁻¹ (MOLLE e CADIER, 1992). Neste estudo, adotamos uma taxa de evaporação e infiltração média de 40% (ARAÚJO e PIEDRA, 2009; LEÃO et al., 2013; OLIVEIRA, 2017).

Para o escoamento, que diz respeito à malha de drenagem do terreno para a captação de água do reservatório, utilizou-se uma taxa hipotética de 30% do volume da precipitação multiplicado à capacidade do reservatório. A capacidade máxima do reservatório é de 6481

m³, considerando uma profundidade de 2,5 metros e um espelho d'água de 7000 m² (Equação de Molle e Cadier, 1992).

Até o momento, temos construído a lógica do componente hídrico do modelo utilizando a precipitação, o reservatório e suas principais perdas de água (evaporação, infiltração) quando sem uso humano ou animal.

Com relação à pastagem natural, o inventário do uso da água deve considerar o balanço hídrico de todas as entradas e saídas, incluindo a água verde ingerida pelos animais durante o pastejo. Para tanto, abordaremos o consumo de água da pastagem natural apenas de forma conceitual no modelo, porém realizando uma ligeira estimativa do consumo de água presente na forragem natural pelo consumo de forragem dos animais.

Como exemplo de pastagem cultivada sob manejo irrigado, foi escolhida a palma forrageira cultivar Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta*). Foi adotada a aplicação de uma lâmina de irrigação de 7,5 mm a cada 14 dias pelo sistema de gotejamento (PEREIRA et al., 2015) durante o período de sete meses, ponderando o período de estiagem da região (LOPES et al., 2017). No período chuvoso o consumo de água foi tratado de forma conceitual.

O modelo possui três principais saídas para a água, evaporação e infiltração, conforme já retratado, vertedouro e usos. O vertedouro, ou sangradouro, tem como função deixar sair o excesso de água do sistema. Neste exemplo, quando a capacidade do reservatório estiver completa, o excesso da água, via precipitação, segue a jusante pelo vertedouro. Quanto aos usos, esses podem ser para uso humano, usos diversos, uso para irrigação e uso animal.

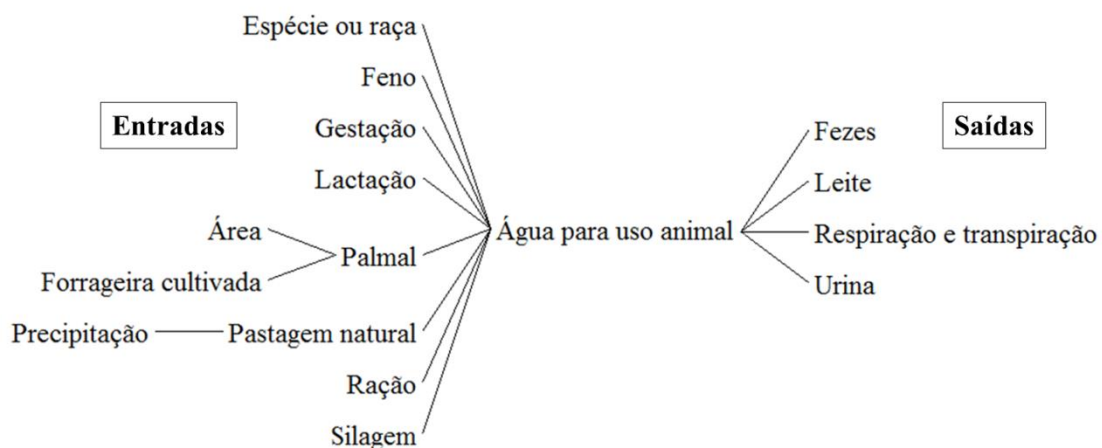
A água para uso humano também faz parte do sistema de produção e consiste no cômputo da quantidade mínima de água para satisfazer as necessidades básicas de uma pessoa. A “água para uso humano” foi estimada em 200 m³ ano⁻¹ para cinco pessoas, levando em conta a demanda mínima de 110 litros por pessoa dia⁻¹ sugerido pela ONU. Já para a “água para usos diversos”, foi adotada a metade do volume hídrico (100 m³) utilizado na variável “água para uso humano”. Já a água para usos diversos compreende toda a água utilizada na fazenda para usos como limpeza de utensílios, lavagem de instalações etc.

O componente animal do sistema é representado como um submodelo, com fluxos e influxos próprios. No submodelo animal, para facilitar o entendimento e arranjo das equações, o cômputo do uso da água será relacionado ao consumo de água verificado na literatura para ovinos (3,42 L dia⁻¹) e caprinos (2,31 L dia⁻¹) sem padrão de raça definida, em estado de manutenção (ALVES et al., 2007) e na fase gestacional, onde foi acrescido para cada espécie um adicional de 126% no consumo de água (BRITO et al., 2007; NRC, 2007). Os dados acima correspondem aos animais criados no Semiárido brasileiro.

Com relação aos bovinos, por carência de informações do consumo de água no Semiárido brasileiro, a demanda hídrica para esta espécie foi preconizada em relação ao consumo de matéria seca e a temperatura do ar em regiões secas (PALLAS, 1986), sendo considerado neste trabalho animais em estado de manutenção e lactação. De acordo com Pallas (1986), para animais criados em temperaturas superiores a 27°C, o consumo de água é estimado em 5,5 L de água por kg de MS ingerida. Assim, para bovinos em estado de manutenção (UA = 450 kg de PV) consumindo 3% do peso vivo em MS, a ingestão diária de água foi estimada em aproximadamente 75 L dia⁻¹. Para animais prenhes, este valor é sugerido 1,5 vezes o consumo de água de um animal em estado de manutenção (aproximadamente 112 L dia⁻¹) e para animais em lactação são acrescentados 0,86 litro de água por litro de leite produzido. Neste estudo foi adotada uma produção estimada de 5 L vaca⁻¹ dia⁻¹ para animais tendo como principal de fonte de alimentação a vegetação da Caatinga (ZOCCAL e DUSI, 2013)

Como entradas de água no animal temos: a água de dessedentação, água contida nos alimentos e água metabólica; como saídas/perdas, temos: água perdida na respiração e transpiração, urina, fezes e leite (animal em lactação) (KHELIL-ARFA et al., 2012). Alguns fatores influenciam diretamente na ingestão de água, como a espécie e a raça (RIBEIRO, 2006; ALVES et al., 2007), manejo alimentar (NEIVA et al., 2004; RIBEIRO, 2006), estado fisiológico (BRITO et al., 2007; NRC, 2007), inclinação do terreno, distribuição das aguadas, temperatura (CÂNDIDO et al., 2004; POMPEU et al., 2009), entre outros (Figura 31).

Figura 31 - Possíveis entradas e saídas que influenciam no consumo de água no submodelo animal



As principais saídas de água do submodelo animal serão tratadas de forma conceitual e evidenciadas no diagrama de fluxos por meio de setas vermelhas (Figura 31). Os cálculos e demais informações pertinentes a cada parâmetro do modelo geral, como valores, lógica da equação, referências e observações estarão disponíveis na memória de cálculo do modelo (ANEXO A).

É importante destacar novamente que as simulações apresentadas neste trabalho têm caráter teórico e ilustrativo, não representando fielmente os componentes do sistema de produção, como as demais categorias animais e rotas mais intrínsecas da água. Contudo, elenca os traços principais do consumo de água de uma pequena propriedade situada no sertão nordestino.

4.2.3 Cenários de consumo de água por caprinos, ovinos e bovinos

Neste tópico são apresentadas diferentes simulações de sistemas de produção envolvendo caprinos, ovinos e bovinos. A princípio, a fazenda hipotética possui uma área não determinada de pastagem natural, uma área de pastagem cultivada com palma forrageira (01 hectare) e um reservatório com capacidade para 6481 m³ de água. O rebanho será composto de 300 caprinos ou 300 ovinos adultos, a depender da simulação. O número de animais do rebanho ovino e caprino parte de comunicação pessoal de pequenos produtores situados nos domínios do Semiárido brasileiro, que afirmam ser um plantel suficiente para uma renda mínima que justifique a sua criação.

Os cenários idealizados para o consumo de água por caprinos e ovinos foram:

Cenário 1: rebanho de 300 ovinos;

Cenário 2: rebanho de 300 caprinos;

Cenário 3: rebanho de 300 ovinos + irrigação do palmar;

Cenário 4: rebanho de 300 caprinos + irrigação do palmar;

Cenário 5: rebanho de 300 ovinos em gestação + irrigação do palmar;

Cenário 6: rebanho de 300 caprinos em gestação + irrigação do palmar;

Com relação aos bovinos, as simulações partem de três diferentes sistemas de produção de leite de base familiar, onde: (1) a produção de leite é destinada para consumo familiar e pequena comercialização com um rebanho de 10 vacas, sendo 4 em lactação; (2)

sistema de produção para comercialização do leite com um rebanho de 20 vacas, estando 11 em lactação e (3) sistema de produção para comercialização do leite com um rebanho de 50 vacas, sendo 34 em lactação (ZOCCAL et al., 2008).

Os cenários idealizados para o consumo de água por bovinos foram:

Cenário 7: rebanho de 6 vacas em manutenção + 4 em lactação;

Cenário 8: rebanho de 6 vacas em manutenção + 4 em lactação + irrigação do palmar;

Cenário 9: rebanho de 9 vacas em manutenção + 11 em lactação;

Cenário 10: rebanho de 9 vacas em manutenção + 11 em lactação + irrigação do palmar;

Cenário 11: rebanho de 16 vacas em manutenção + 34 em lactação;

Cenário 12: rebanho de 16 vacas em manutenção + 34 em lactação + irrigação do palmar

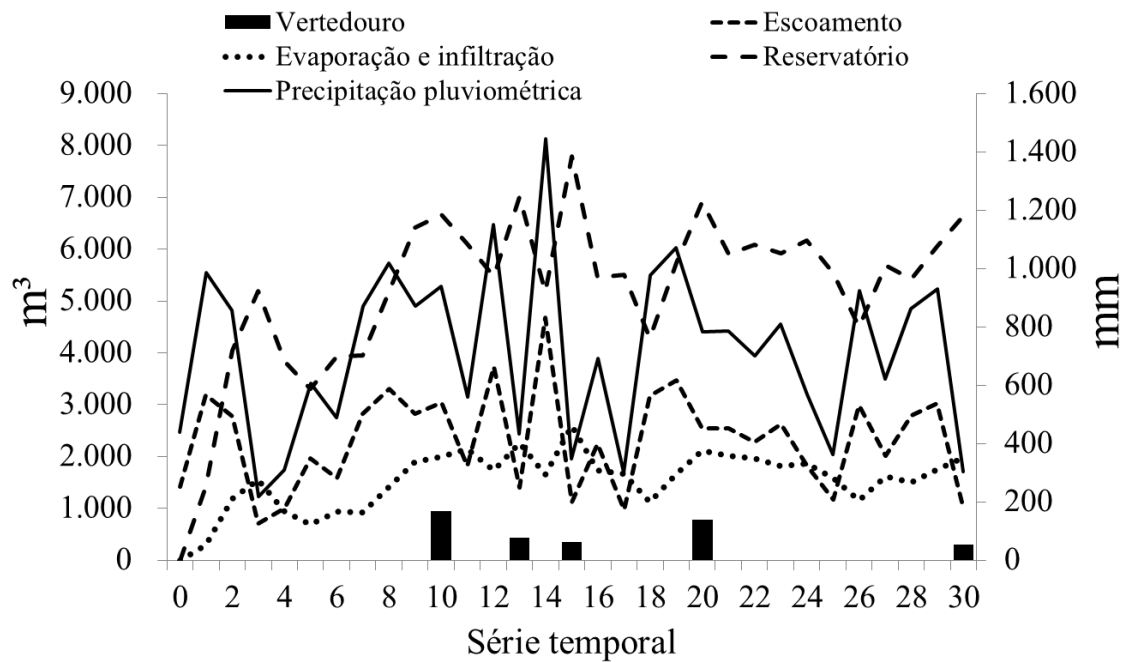
4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Simulação I - Estimativa do volume máximo do reservatório

Nesta primeira etapa, é necessário estabelecer o volume máximo do reservatório para que possam ser simulados os eventos de recarga, evaporação, infiltração e sangria do pequeno açude. Em um cenário de 30 anos, para um açude com capacidade máxima de 6481 m³ (profundidade máxima de 2,5 m e espelho d'água de 7000 m²), verificou-se apenas cinco momentos onde o volume precipitado excedeu a capacidade do reservatório apesar da elevada taxa de recarga do açude (Escoamento) (Figura 32).

A elevada perda de água do sistema deve-se as altas taxas de evaporação e infiltração comumente verificadas nos açudes de pequeno porte (MOLLE; CADIER, 1992; SANTOS et al., 2009). Esta primeira análise é importante para avaliar a capacidade dos reservatórios e determinar o volume mínimo para o abastecimento da propriedade, tendo em conta as perdas naturais de água do sistema.

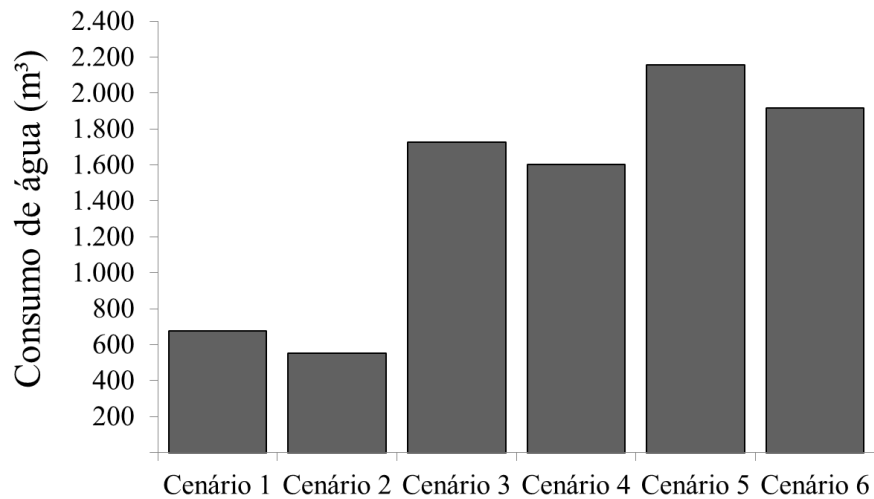
Figura 32 - Taxas de recarga do reservatório (m^3), escoamento superficial (m^3), evaporação (m^3), infiltração (m^3), sangria (m^3) e precipitação (mm) estimadas para uma microbacia hidrográfica hipotética no município de Petrolina-PE



4.3.2 Simulação II - Consumo de água em diferentes cenários de produção de caprinos e ovinos em ambiente semiárido

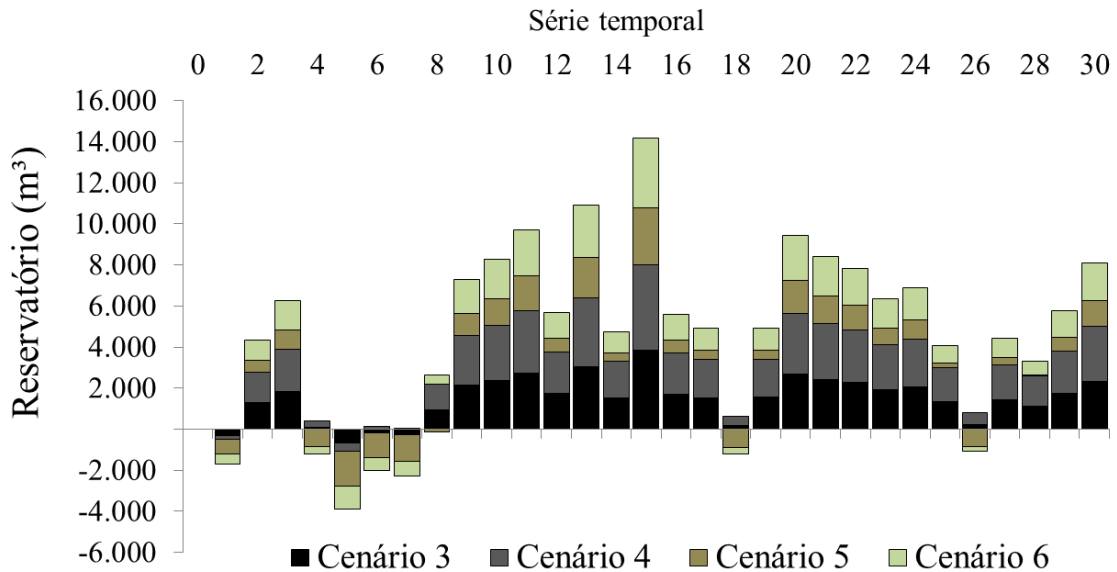
A maior exigência em água dos ovinos em relação aos caprinos aumentou o consumo de água do reservatório em aproximadamente 18% ($123 m^3$) nos cenários 1 e 2 (Figura 33), quantia suficiente para o abastecimento de uma família de cinco pessoas por 223 dias de acordo com a ONU ($110 L$ por pessoa dia^{-1}).

Figura 33 - Cenários e consumo de água por seis diferentes sistemas de produção de caprinos e ovinos para o município de Petrolina-PE



Nos cenários 03 e 04, onde é praticado o cultivo da palma forrageira, a irrigação elevou o consumo de água consideravelmente (Figura 33), causando déficit hídrico no reservatório. O consumo de água do palmar durante o período seco (sete meses) seria o equivalente a 1050 m³. No cenário 04, verifica-se déficit hídrico nos anos 01 e 07, totalizando um volume de -578 m³. Já para o cenário 03, o déficit de água foi maior (1406 m³), abrangendo um maior número de anos (anos 01, 07, 08 e 09) (Figura 34).

Figura 34 - Simulações do uso da água do reservatório por quatro diferentes sistemas de produção de caprinos e ovinos para o município de Petrolina-PE



Nos dois últimos cenários, agora para animais prenhes (Cenários 05 e 06), o consumo de água foi mais significativo (Figura 33). O número de anos em que o reservatório entra em déficit aumentou e consequentemente o volume a ser demandado para suprir as necessidades da propriedade em 6345 e 3856 m³, respectivamente (Figura 34).

Nos anos onde o reservatório seca completamente em função não somente das perdas naturais, mas do intenso uso pela propriedade, convém ao produtor ou técnico dimensionar o sistema de produção para aquele volume de água disponível, na grande maioria desconhecido pelos atores. Uma vez conhecido a demanda hídrica da propriedade, é possível gerenciar o uso deste recurso. Nos dois cenários anteriormente citados, a prática da irrigação do palmar estaria comprometida, a não ser que o produtor obtenha água de fontes externas para o consumo da propriedade.

A irrigação, contida no item “pastagem cultivada”, foi inserida para avaliação do impacto de um dos mais econômicos sistemas de irrigação (gotejamento) e que vem sendo bastante utilizada no cultivo da palma forrageira (ARAÚJO et al., 2019; SANTOS et al., 2020). Nos cenários 05 e 06, o pequeno reservatório não possibilita o uso da irrigação de maneira contínua. A diminuição do consumo de água pela propriedade, como por exemplo, reduzir o número de animais, não causaria efeito sensível no consumo de água da propriedade, não justificando a redução do rebanho.

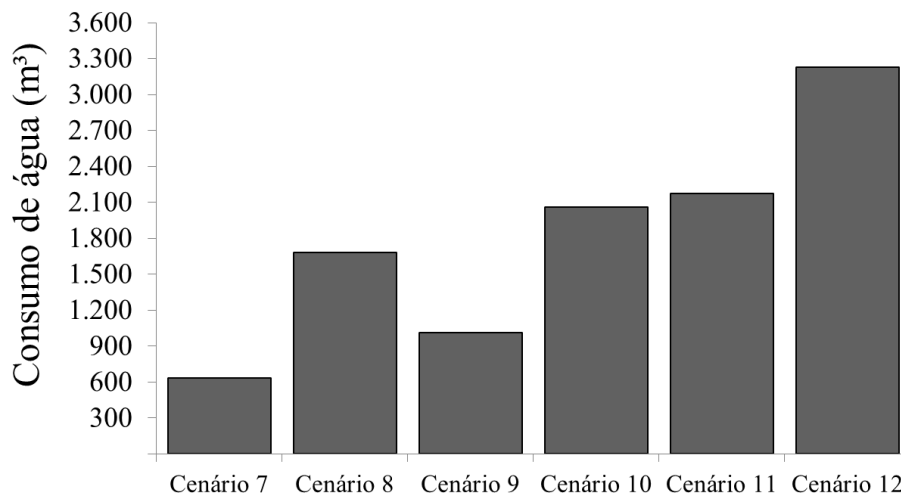
Para a condição de um pequeno reservatório, a palma forrageira foi escolhida de maneira planejada, uma vez que esta cultura demanda pouca água (PEREIRA et al., 2017) e a supressão da irrigação não causaria prejuízo sensível, logo que se trata de uma planta tolerante a períodos longos de estiagem, apresentando alta eficiência no uso da água (LÉDO et al., 2019; SOUZA et al., 2019). A irrigação do palmar poderia ser realizada de maneira complementar (SANTOS et al., 2020) para elevar a produção de biomassa da propriedade, atendendo a condições particulares, como a venda de cladódios e/ou propiciar maior segurança alimentar para os animais. Dessa forma, a irrigação se daria de maneira controlada pelo monitoramento do aporte hídrico do reservatório e a interrupção desta se daria naqueles anos onde o reservatório não recebeu recarga suficiente.

Fica, portanto, evidente a necessidade de se trabalhar a água na propriedade rural como uma unidade particular, elencando o potencial da propriedade em função da disponibilidade de água, obviamente, e de como será o uso dessa água em função do solo e dos objetivos do produtor. Porém, não é tão simples identificar por onde a água caminha dentro da propriedade sem uma visão sistêmica, abrangendo as entradas e saída para melhor gerir esse importante recurso.

4.3.3 Simulação III - Consumo de água em diferentes cenários de produção de bovinos em ambiente semiárido

Notadamente, a irrigação do palmar causou o maior impacto no consumo de água nos diferentes cenários propostos (Figura 35). A maior amplitude no volume hídrico é verificada entre os cenários 07 e 08, sendo esta resposta esperada em virtude do baixo consumo de água do pequeno número de animais (10 vacas). Nos cenários 07 e 09, com um plantel de 04 e 11 vacas produzindo 20 e 55 L dia⁻¹, respectivamente, o consumo de água pela propriedade como um todo não causou a depleção total do açude para um horizonte hipotético de 30 anos.

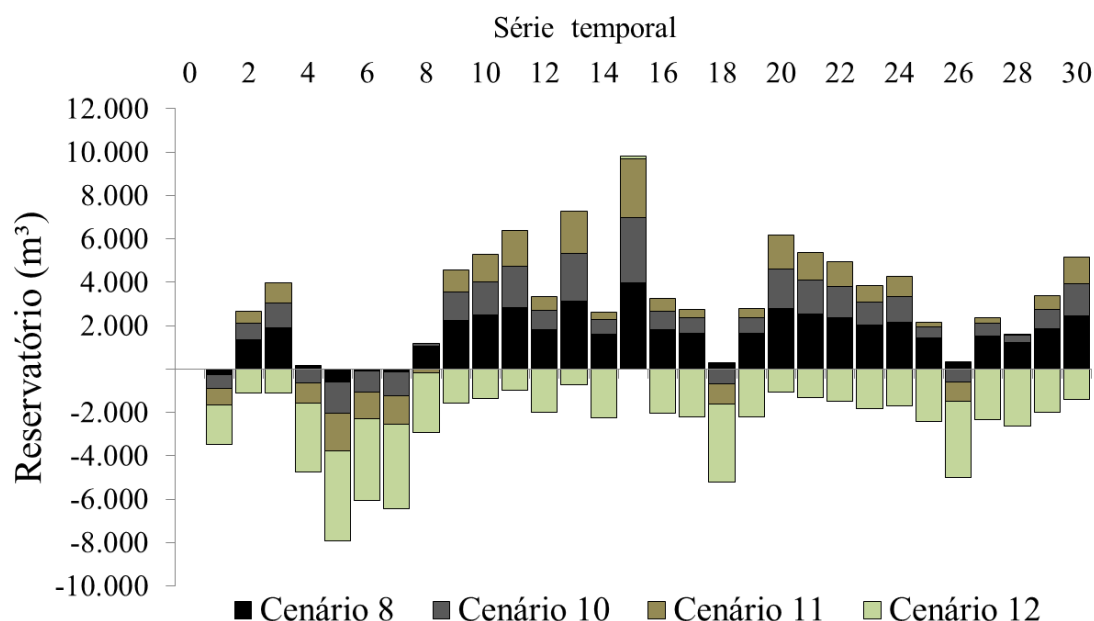
Figura 35 - Cenários e consumo de água por seis diferentes sistemas de produção de bovinos para o município de Petrolina-PE



Considerando o consumo de água, o volume de leite produzido nos cenários 07 e 09 (Figura 35) e o preço médio pago ao produtor pelo litro de leite “in natura” (R\$ 3,00) no mercado informal (comunicação pessoal), condição comum de comercialização do leite praticada pela pequena propriedade na região Nordeste (REIS FILHO; SILVA, 2013), as estimativas apontam para uma condição regular de suprimento de água pelo pequeno açude que permitiria uma atividade econômica com receita bruta de R\$ 1.800,00 e R\$ 4.950,00 ao mês, respectivamente, pela venda do leite produzido. Apesar de que as estimativas aqui apresentadas não consideram os custos envolvendo todo o sistema de produção e pondera o uso de um sistema extensivo na Caatinga, estas inferências são importantes, uma vez que aproximadamente 56% das propriedades leiteiras contam com um rebanho entre 10 e 99 animais (REIS FILHO; SILVA, 2013).

No cenário 11, observa-se o primeiro caso onde o consumo de água pelo rebanho sem o uso da irrigação seca o reservatório, sendo equiparado ao cenário 10, onde a irrigação do palmal projeta um consumo de 1050 m³ de água (Figura 36). Partindo de um reservatório completamente seco no ano zero da simulação, a demanda hídrica dos cenários 10 e 11 estaria comprometida nos primeiros sete anos, cujo volume de chuvas, simulado com base no histórico de Petrolina-PE, não seria capaz de atender a demanda do rebanho e acumular água no pequeno açude.

Figura 36 - Simulações do uso da água do reservatório por quatro diferentes sistemas de produção de bovinos para o município de Petrolina-PE



O pequeno barramento exemplificado neste estudo é um retrato da pequena açudagem no Semiárido brasileiro, em sua maioria pouco profundos e com grande espelho d'água, o que facilita as perdas por evaporação (MOLLE, 1994). As perdas naturais de água por evaporação e infiltração correspondem a aproximadamente 40% do volume do reservatório de pequeno porte (ARAÚJO; PIEDRA, 2009; LEÃO et al., 2013; OLIVEIRA, 2017). Nestes cenários, corresponderiam a uma perda de aproximadamente 6000 m³ nos primeiros sete anos, equivalente a capacidade máxima do reservatório em questão. Estas perdas não podem ser evitadas, contudo este volume potencialmente perdido pode ser aproveitado para uso de irrigação quando não houver necessidade de água por outros componentes da propriedade. Neste caso, parte da água seria “retida” nos tecidos vegetais de plantas estratégicas, como a palma forrageira, onde aproximadamente 90% da biomassa total fresca é composta de água, sendo, portanto, uma importante reserva hídrica e de forragem para os rebanhos.

No cenário 12, com exceção do ano 15, em que a precipitação simulada foi superior 1400 mm durante a estação chuvosa, a demanda hídrica do rebanho juntamente com a irrigação do palmar seria impraticável (Figura 36). A estimativa da precipitação, utilizando a função densidade de probabilidade do comportamento da chuva em Petrolina-PE para geração de uma série temporal, ao invés de dados médios da série medida, traz uma perspectiva mais efetiva da realidade do aporte hídrico frente a incerteza da precipitação no Semiárido. Além

de simular os anos de baixa precipitação, também estima aqueles anos onde o volume de chuvas é superior à média histórica. Tomando por exemplo o cenário 12, se utilizado o volume médio da precipitação ocorrida nos últimos 30 anos em Petrolina-PE (476 mm), ao invés da simulação da precipitação pela função *Weibull* (0,1e+012,2.6453,0,476,0), em todo cenário de 30 anos o déficit hídrico seria de -3998 ± 546 mm, com déficit superior a -4000 mm a partir do sétimo ano deste ensaio.

Em suma, este trabalho buscou explorar indicadores práticos por meio da modelagem com a pretensão de ajudar técnicos e agricultores a compreender e otimizar o uso da água em termos de produtividade na pequena propriedade locada no Semiárido brasileiro. Uma vez estando o modelo em funcionamento, é possível realizar inúmeras simulações e combinações para encontrar a melhor forma de uso da água, a depender do tamanho do rebanho, do reservatório e do uso ou não de irrigação.

Pela facilidade de alteração das variáveis, o produtor ou técnico poderá lançar mão da modelagem para criar cenários que auxiliem na tomada de decisão. Através da simulação, a lógica da propriedade rural pode tomar seu rumo, muitas vezes atrapalhado, quando em inúmeros casos a compra dos animais vem primeiro para em seguida se pensar no que vai dar de comer e beber.

As simulações retratadas neste estudo refletem um pouco da realidade enfrentada por pequenos produtores que dispõem do pequeno barramento como a única fonte de água para os rebanhos, lavouras e da família. A compra de água de terceiros por meio dos carros pipa é rotineira e traz onerosos custos a atividade agropecuária, na maioria dos casos de pura subsistência.

A dimensão correta dos reservatórios, a renovação do leito (retirada dos sedimentos) e conservação da mata ciliar dos riachos presente na microbacia são ações que devem ser enfatizadas para potencializar o uso da água do pequeno açude, melhorando a vida de quem produz no Semiárido nordestino.

4.4 Conclusão

Em um cenário de 30 anos, as elevadas taxas de evaporação e de infiltração naturais do pequeno açude são as maiores causadoras das perdas de água do sistema. À medida que a irrigação do palmar é considerada no sistema e a exigência hídrica dos animais aumenta, são verificados anos onde o reservatório seca completamente.

Por meio destes resultados, é pretendida a utilização da metodologia como um novo componente do Sistema Asa Branca, permitindo simular o consumo de água ao nível de propriedade. Nesta simulação, é possível estimar através de dados reais, combinações para encontrar a melhor forma de uso da água, a depender do tipo de rebanho e do uso de irrigação. Em situação contrária, pode ajudar no cálculo de construção de um novo açude, em função da demanda do rebanho pretendida.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E IMPLICAÇÕES FUTURAS

As técnicas de modelagem e de Dinâmica de Sistemas abordadas neste estudo, como ferramentas de tomada de decisão, mostraram-se eficientes para vislumbrar a propriedade com um enfoque sistêmico. Os resultados e metodologias apresentadas podem contribuir para a compreensão e funcionamento dos sistemas, sobretudo da estimativa da produção vegetal, também sob a perspectiva das mudanças climáticas futuras, do uso da água, e as suas inter-relações, que podem contribuir significativamente no processo de planejamento e gestão de sistemas pastoris no Semiárido.

Em pesquisas futuras, a metodologia do Sistema Asa Branca poderá ser utilizada para avaliar pontos específicos, como por exemplo, a inclusão de aspectos nutricionais das forrageiras, podendo assim, partir para uma abordagem mais detalhada dos componentes que interferem de maneira significativa o sistema de produção.

Outros pontos que deverão ser avaliados, serão a avaliação de novas forrageiras e a modelagem destas em outros locais, incluindo a perspectiva do uso da água e os cenários climáticos futuros. Dessa forma, é possível estimar uma taxa de lotação sustentável das pastagens naturais, por meio da inserção de culturas estratégicas, reduzindo o risco natural da pecuária nestas regiões. Espera-se, portanto, promover o ajuste da taxa de lotação por meio da gestão eficiente dos recursos forrageiros, conservando a biomassa de forragem excedente e garantindo que este excedente alcançado pelos anos produtivos, supra o déficit de forragem dos anos ruins, buscando a estabilidade do sistema de produção ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- AERTSEN, Win *et al.* Evaluation of modelling techniques for forest site productivity prediction in contrasting ecoregions using stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA). **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 7, p. 929-937, 2011.
- ALVES, Juliana N. *et al.* Feno de erva-sal (*Atriplex nummularia* Lindl.) e palma forrageira (*Opuntia ficus* Mill.) em dietas para caprinos e ovinos. **Revista Científica de Produção Animal**, Fortaleza, v. 9, n. 1, p. 43-52, 2007.
- ANDRADE, A. P. *et al.* Produção animal no bioma caatinga: Paradigmas dos 'Pulsos-Reservas'. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 1, p. 138-155, 2006.
- ANGERER, Jay P. **Examination of high resolution rainfall products and satellite greenness indices for estimating patch and landscape forage biomass**. 2010. 142 p. Tese de Doutorado. Texas A & M University.
- ARAÚJO FILHO, João A. **Manejo Pastoril Sustentável da Caatinga**. Projeto Dom Helder Câmara. Recife, 2013. 200 p.
- ARAUJO FILHO, João A.; VALE, L. V.; SANTOS, J. W. Níveis de adubação em estrato herbáceo nativo no sertão cearense. In: Embrapa Caprinos e Ovinos-Resumo em anais de congresso (ALICE). In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 25., 1988, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1988. p. 170., 1988.
- ARAÚJO, José C.; GONZÁLEZ PIEDRA, Julio I. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 23, n. 8, p. 1169-1178, 2009.
- ARAÚJO, José S. *et al.* **Palma Forrageira: plantio e manejo**. Campina Grande-PB. INSA, 2019. 60 p.
- ASSUNÇÃO, Luiz M.; LIVINGSTONE, I. Desenvolvimento inadequado: construção de açudes e secas no sertão do Nordeste. **Revista Brasileira de Economia**, v. 47, n. 3, p. 425-448, 1993.
- BARBOSA, Danilo H. *et al.* A gestão de mudanças na logística: estudo exploratório em empresas do setor de bens de capital agrícolas. **Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 14, n. 1, p. 136, 2019.
- BARIONI, L. G.; VELOSO, R. F.; MARTHA JÚNIOR, G. B. Modelos matemáticos aplicados a sistemas de produção animal em pastagens. **SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM**, v. 1, p. 235-278, 2002.
- BERTALANFFY, Ludwig v. **Teoria geral dos sistemas: fundamentos, desenvolvimento e aplicações**. Petrópolis, RJ: Vozes, v. 359, 2008.

BOTREL, M. de A.; NOVAES, Luciano P.; ALVIM, Maurílio J. Características forrageiras de algumas gramíneas tropicais. **Embrapa Gado de Leite-Documentos (INFOTECA-E)**, 1998. 35 p.

BRITO, T. S. *et al.* Consumo de água e sal mineral de ovelhas da raça Santa Inês gestantes submetidas a dois manejos nutricionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA. 2007. Londrina. A zootecnia frente a novos desafios: **Anais...** Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2007. 1 CD-ROM.

CAMPOS, José Nilson B. Vulnerabilidades hidrológicas do semi-árido às secas. **Planejamento e políticas públicas**, n. 16, 2009.

CÂNDIDO, Magno José. D. *et al.* Comportamento de ovinos em pastagem irrigada sob lotação rotativa com três períodos de descanso. REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, v. 41, 2004. Campo Grande. A produção animal e a segurança alimentar. **Anais...** Campo Grande: Sociedade Brasileira de Zootecnia: Embrapa Gado de Corte, 2004. 1 CD-ROM.

CÂNDIDO, Magno José D. *et al.* Forage-Balance Guarantee System: defining forage storage capacity to stabilize livestock production in vulnerable ecosystems. **Agricultural Systems**. 2021 (submetido).

CATTO, Jennifer L.; JAKOB, Christian; NICHOLLS, Neville. A global evaluation of fronts and precipitation in the ACCESS model. **Australian Meteorological and Oceanographic Society Journal**, v. 63, p. 191-203, 2013.

CAYA, Daniel *et al.* Evaluating and Improving Regional Climate Projections. **WCRP Informal Report**, n. 5, 2009. 22 p.

CEARÁ. Ceará em Mapas - **IPECE 2020 - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará**. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/>. Acesso em: 15 set. 2020.

CHANG, Chia-C.; LIN, Shik-K.; YU, Min-T. Valuation of catastrophe equity puts with Markov-modulated Poisson processes. **Journal of Risk and Insurance**, v. 78, n. 2, p. 447-473, 2011.

CHECKLAND, P. **Systems thinking, systems practice**. Chinchester: John Wiley & Sons, 1989. 330p.

CIRPKA, Olaf A.; VALOCCHI, Albert J. Debates—Stochastic subsurface hydrology from theory to practice: Does stochastic subsurface hydrology help solving practical problems of contaminant hydrogeology? **Water Resources Research**, v. 52, n. 12, p. 9218-9227, 2016.

COULON, A. *et al.* A stochastic movement simulator improves estimates of landscape connectivity. **Ecology**, v. 96, n. 8, p. 2203-2213, 2015.

CUBASCH, U. *et al.* Introduction. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, p. 119-158, 2013.

DERESSA, Temesgen T.; HASSAN, Rashid M. Economic impact of climate change on crop production in Ethiopia: Evidence from cross-section measures. **Journal of African economies**, v. 18, n. 4, p. 529-554, 2009.

DONATO, Sérgio Luiz R.; JUNIOR, Paulo Roberto Fernandes C. Irrigação na palma forrageira. **Revista Agrotecnologia**, v.11, n.1, p.75-86, 2020.

DURÁN PUGA, Noé *et al.* Impactos del cambio climático en la distribución potencial de *Morus alba* L. en México. **Revista mexicana de ciencias agrícolas**, v. 7, n. SPE13, p. 2511-2521, 2016.

ERENOĞLU, R. Cüneyt. Performance of GPS Stochastic Modeling for Forest Environment. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 33, n. 2, p. 285-301, 2012.

FERREIRA, Daniel F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FORSTER, Piers *et al.* Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2. In: **Climate Change 2007**. The Physical Science Basis. 2007. 106 p.

FORTIN, M.-J. *et al.* On the role of spatial stochastic models in understanding landscape indices in ecology. **Oikos**, v. 102, n. 1, p. 203-212, 2003.

GASPARINI, Liz Vanessa L. *et al.* Sistemas integrados de produção agropecuária e inovação em gestão: Estudos de casos no Mato Grosso. **Texto para Discussão**, 2017. 43 p.

HOLECHEK, Jerry L. An approach for setting the stocking rate. **Rangelands**, v. 10, n. 1, p. 10-14. 1988.

HONKALASKAR, Vijay H.; D BAGDE, Nikhilesh; B KEDARE, Shireesh. Understanding Agrarian crisis: A participatory and qualitative systemic analysis. **Journal of Agricultural Studies**, v. 6, n. 1, p. 260-297, 2017

IBGE/SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censoagropecuario/censoagropecuario2017>. Acesso em: 04 jan. 2021.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. United Kingdom and New York, p. 19, 2013.

JATOBÁ, Lucivânio; SILVA, Alineaurea F.; GALVÍNCIO, Josiclêda D. A dinâmica climática do Semiárido em Petrolina-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 136-149, 2017.

JONES, James W. *et al.* Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. **Agricultural systems**, v. 155, p. 269-288, 2017.

KAYANO, Mary T.; ANDREOLI, Rita V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 27, n. 4, p. 531-540, 2007.

KHELIL-ARFA, H. *et al.* Prediction of water intake and excretion flows in Holstein dairy cows under thermoneutral conditions. **Animal**, v. 6, n. 10, p. 1662-1676, 2012.

KÖPPEN, W. Das Geographische System der Klimate, Vol. 1., Part C. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Handbuch der Klimatologie**. Gebruder Borntraeger, Berlin, 1936. p. 1-44.

KWAK, Sang G.; KIM, Jong H. Central limit theorem: the cornerstone of modern statistics. **Korean journal of anesthesiology**, v. 70, n. 2, p. 144, 2017.

LEÃO, Raimundo A. de O. *et al.* Estimation of evaporation in the Banabuiú dam, in the state of Ceará, Brazil, by different combined methods, derived from the Penman equation. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 1, p. 129-144, 2013.

LÉDO, Alex A. *et al.* Produtividade e eficiência do uso da água da palma forrageira sob arranjos, espaçamentos e adubações. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 6, p. 413-418, 2019.

LEGATES, David R.; MCCABE JR, Gregory J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water resources research**, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LETTENMAIER, Dennis. Stochastic modeling of precipitation with applications to climate model downscaling. In: **Analysis of climate variability**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1995. p. 197-212.

LEVIS, Samuel *et al.* CLMcrop yields and water requirements: avoided impacts by choosing RCP 4.5 over 8.5. **Climatic Change**, v. 146, n. 3, p. 501-515, 2018.

LIMA JÚNIOR, Edmilson R. **Uso de ferramentas de agricultura de precisão para o planejamento de uma propriedade no semiárido do sertão central do Ceará**. 2014. 50 f. (Monografia em Agronomia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.

LIMA, José R.; MAGALHÃES, Antonio R. Secas no Nordeste: registros históricos das catástrofes econômicas e humanas do século 16 ao século 21. **Parcerias Estratégicas**, v. 23, n. 46, p. 191-212, 2019.

LIRA, M. de A. *et al.* Utilização do pasto nativo e cultivado em recria e engorda de bovinos no semi-árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 16, n. 3, p. 267-274, 1987.

LOPES, Iug *et al.* Balanço hídrico em função de regimes pluviométricos na região de Petrolina-PE. **Irriga**, v. 22, n. 3, p. 443-457, 2017.

LOPEZ-COLLADO, Jose *et al.* Contribution of dung beetles to cattle productivity in the tropics: A stochastic-dynamic modeling approach. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 78-87, 2017.

MARANHÃO, Samuel R. *et al.* Morfofisiologia do capim-buffel cultivado sob diferentes suprimentos hídricos na estação seca e estação seca chuvosa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 8, p. 566-571, 2019.

MARANHÃO, Samuel R. *et al.* Morphophysiology of tropical grasses under different water supply in two growing seasons: II. BRS Massai and BRS Tamani grasses. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 301-318, 2021.

MARQUES, Flávio A. *et al.* Solos do nordeste. **Embrapa Solos-Fôlder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)**, 2014.

MENESES, Valdênio F. “Saúde e rusticidade”: a convivência com o semiárido entre grandes pecuaristas do Nordeste. **Sociologias**, v. 22, n. 55, p. 354-380, 2020.

METROPOLIS, Nicholas; ULAM, Stanislaw. The monte carlo method. **Journal of the American statistical association**, v. 44, n. 247, p. 335-341, 1949.

MIYAMOTO, Koichi; SHIOHARA, Kenji. Reduction of qubits in a quantum algorithm for Monte Carlo simulation by a pseudo-random-number generator. **Physical Review A**, v. 102, n. 2, p. 022424, 2020.

MOLLE, F. **Geometria dos Pequenos Açudes**. SUDENE-DPG/PRN/HME, Recife, 1994. 139 p.

MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do pequeno açude**. Recife. SUDENE/ORSTOM, SUDENE/TAPI, 1992. 523 p.

MOREIRA, José N. *et al.* Potencial de produção de capim búffel na época seca no semi-árido pernambucano. **Revista Caatinga**, v. 20, n. 3, p. 20-27, 2007.

MOURA, Geovane A. *et al.* Acúmulo de fitomassa de capim-corrente em função da adubação fosfatada e nitrogenada. In: **II Congresso Internacional das Ciências Agrárias (COINTER-PDVagro)**, 2017.

MOUSINHO, Francisco Edinaldo P. *et al.* Variabilidade espacial dos percentis 75 da precipitação pluvial anual para o Estado do Piauí. **Irriga**, v. 11, n. 2, p. 178-187, 2006.

NEIVA, José Neuman M. *et al.* Efeito do estresse climático sobre os parâmetros produtivos e fisiológicos de ovinos Santa Inês mantidos em confinamento na região litorânea do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 33, n. 3, p. 668-678, 2004.

NOBEL, Park S. **Environmental biology of agaves and cacti**. Cambridge University Press, 2003.

NRC - NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Nutrient requirements of small ruminants: sheep, goats, cervids, and new world camelids**. Washington, DC, 2007. 384 p.

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development. **Sustainable management of water resources in agriculture**. 2010. 122 p.

OLIVEIRA, M. C. *et al.* Comportamento de gramíneas forrageiras sob condições de pastejo intensivo por bovinos na região semi-árida do Nordeste do Brasil. **EMBRAPA-CPATSA. Documentos** 56, 1988. 15 p.

OLIVEIRA, Martiniano C.; SILVA, CMM de S.; DE SOUZA, Francisco B. Capim buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) preservação ex-situ e avaliação aprofundada. In: QUEIROZ, MA de; GOEDERT, CO; RAMOS, SRR (Ed.). **Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o Nordeste brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido; Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 1999.

OLIVEIRA, Rodrigo Rudson Venâncio de M. **Perda de água por evaporação em um pequeno reservatório do semiárido**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

OPIO, C.; GERBER, P.; STEINFELD, H. Livestock and the environment: addressing the consequences of livestock sector growth. **Advances in Animal Biosciences**, v. 2, n. 3, p. 601-607, 2012.

PALISADE CORPORATION. **The DecisionTools Suite 8.0.0**. New York, 2020.

PALLAS P. Water for animals. Land and Water Development Division. **FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)**, Rome, Italy. 1986. 82 p.

PEREIRA, Poliana de C. *et al.* Morfogênese da palma forrageira irrigada por gotejamento. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 3, p. 184-195, 2015.

PEREIRA, Poliana de C. *et al.* Water balance in soil cultivated with forage cactus clones under irrigation. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 3, p. 776-785, 2017.

POMPEU, Roberto Cláudio Fernandes F. *et al.* Desempenho agrônômico de capim-búffel cultivar gayndah sob diferentes regimes hídricos em duas estações (seca e chuvosa). **Embrapa Caprinos e Ovinos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2018. 23 p.

POMPEU, Roberto Cláudio Fernandes F. *et al.* Desempenho agrônômico de *Megathyrsus maximus* cultivares Massai e Tamani sob diferentes regimes hídricos em duas estações (seca e chuvosa). **Embrapa Caprinos e Ovinos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2018. 32 p.

POMPEU, Roberto Cláudio Fernandes F. *et al.* Comportamento de ovinos em capim-tanzânia sob lotação rotativa com quatro níveis de suplementação concentrada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 2, p. 374-383, 2009.

REIS FILHO, Raimundo José C.; SILVA, Rodrigo G. **Cenários para o leite e derivados na Região Nordeste em 2020**. Recife: SEBRAE, 2013. 154 p.

RIBEIRO, Valéria L. *et al.* Comportamento ingestivo de caprinos Moxotó e Canindé submetidos à alimentação à vontade e restrita. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 28, n. 3, p. 331-337, 2006.

RIBEIRO, Wagner C. **Geografia Política da Água**. São Paulo: Annablume, 2008. 162 p.

RODRIGUES, E. S. **Os cursos da água na história: simbologia, moralidade e a gestão de recursos hídricos**. 1998. 166 f. Tese (Doutorado) - Fundação Oswaldo Cruz/Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro.

ROGELJ, Joeri; MEINSHAUSEN, Malte; KNUTTI, Reto. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. **Nature climate change**, v. 2, n. 4, p. 248-253, 2012.

ROTENBERG, E.; YAKIR, D. Contribution of semi-arid forests to the climate system. **Science**, v. 327, n. 5964, p. 451-454, 2010.

SAMPAIO, Yony; SAMPAIO, Luciano; BARROS, Emanuel de S. Ajustes ambientais nos modelos DEA e a agricultura irrigada. **Economia Aplicada**, v. 16, n. 3, p. 381-397, 2012.

SANTANA, Daniel F. Y. *et al.* Dry matter intake and performance of Girolando and Guzerá heifers and Guzerá under supplementation in caatinga, during the rainy season, in Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 10, p. 2148-2154, 2010.

SANTOS, Flávia A. *et al.* Estimativa e análise do volume dos pequenos açudes através de imagem de satélite e levantamento de campo na bacia hidrográfica do Açude Sumé. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2009. 14 p.

SANTOS, Humberto G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 355 p.

SILVA, Célia M. M. S.; DE OLIVEIRA, Martiniano C.; SEVERINO, G. Avaliação da produtividade de treze cultivares de capim buffel, na região semi-árida de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 22, n. 5, p. 513-520, 1987.

SILVA, Rodrigo. G. *et al.* Orçamentação Forrageira de Longo Prazo no Semiárido. **Revista Científica de Produção Animal**, v. 15, n. 2, p. 98-110, 2013.

SOARES NETO, J. P.; BEZERRA, A. R. G.; MOSCON, E. S. Probabilidade e análise decadal da precipitação pluvial da cidade de Barreiras-Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 3, p. 470-477, 2013.

SOUZA, J. T. A. *et al.* Rendimento quântico e eficiência de uso da água de genótipos de palma forrageira no Semiárido brasileiro. **Archivos de zootecnia**, v. 68, n. 262, p. 268-273, 2019.

SRIDHARAN, Vignesh *et al.* The impact of climate change on crop production in Uganda—an integrated systems assessment with water and energy implications. **Water**, v. 11, n. 9, p. 1805, 2019.

STUTH, J. W. *et al.* **PHYGROW users guide and technical documentation**. Department of Rangeland Ecology and Management: Texas A&M University, 2003. 79 p.

SUN, Hongxia; WAN, Yao; LV, Huirong. System Dynamics Model for the Evolutionary Behaviour of Government Enterprises and Consumers in China's New Energy Vehicle Market. **Sustainability**, v. 12, n. 4, p. 1578, 2020.

THOMSON, Allison M. *et al.* RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic change**, v. 109, n. 1, p. 77-94, 2011.

TUCCI, C. E. M. **Hydrological models**. Porto Alegre: Ed University/UFRGS/Brazilian Water Resources Association, 1998.

VENTANA SYSTEMS, inc. **VENSIM PLE**. Available at: <http://www.vensim.com>, 2010.

VERA COSSÍO, D. Agriculture and rural employment agriculture in bolivia: Price controls consequences in agriculture. **Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico**, La paz, n. 17, p. 113-134, 2012.

VIRGENS FILHO, Jorim S. *et al.* Modelo computacional estocástico para simulações de séries climáticas diárias de umidade relativa do ar, baseado na parametrização dinâmica das distribuições de probabilidade decorrente da retroalimentação de dados. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 5, 2017.

WILLMOTT, Cort J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

WINTER, C. L. Stochastic hydrology: practical alternatives exist. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 18, n. 4, p. 271-273, 2004.

YORIYAZ, Hélio. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 3, n. 1, p. 141-149, 2009.

ZOCCAL, R. *et al.* **Competitividade da cadeia produtiva do leite no Ceará: produção primária**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de leite, 2008. 384 p.

ZOCCAL, R.; DUSI, G. A. Modelo ideal para produção de leite no Brasil. **Animal Business Brazil**, v. 9, p. 34-37, 2013.

APÊNDICE A – SÉRIES SINTÉTICAS DA PRODUTIVIDADE E IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DOS CAPINS BUFFEL E CORRENTE

Figura 37 - Série histórica da produtividade do capim-buffel estimada pelo *software* PHYGROW para o município de Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil

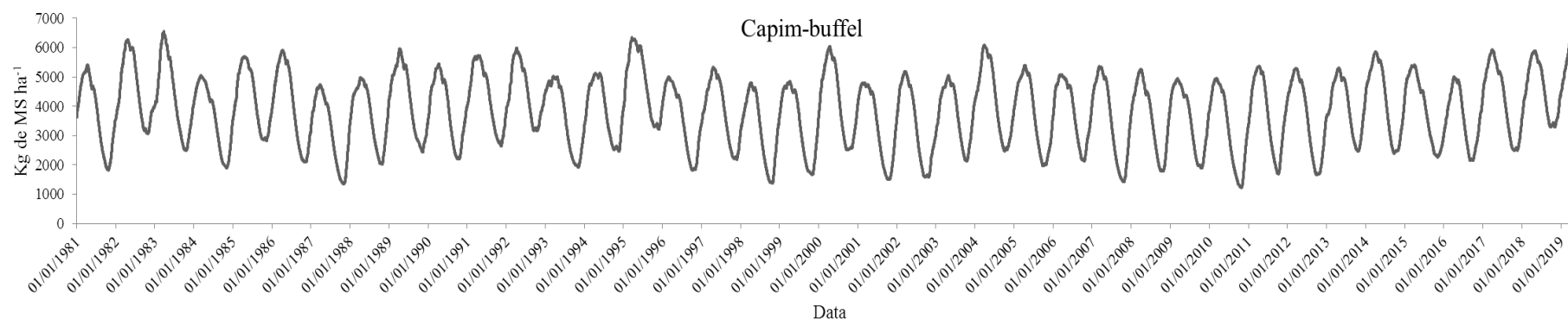


Figura 38 - Série histórica da produtividade do capim-corrente estimada pelo *software* PHYGROW para o município de Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil

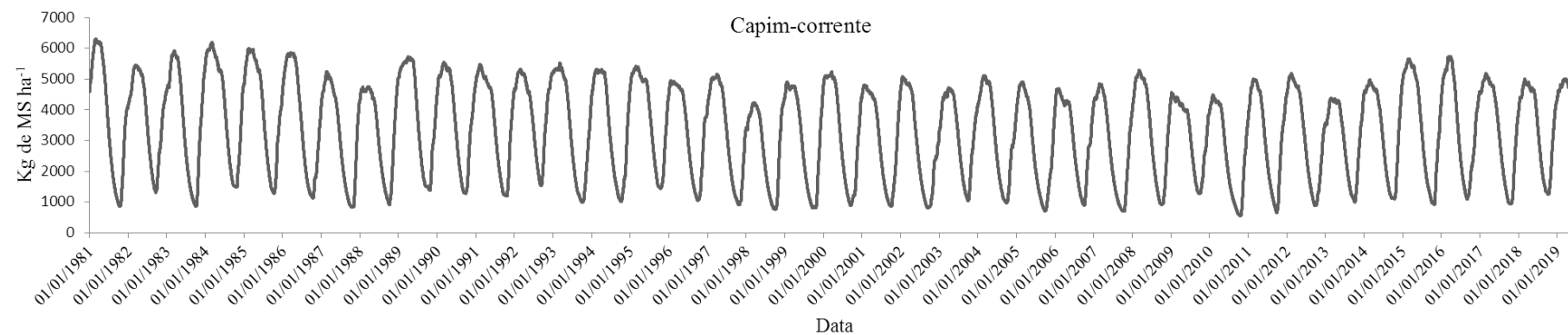


Figura 39 - Simulação do impacto das mudanças climáticas na produtividade do capim-buffel em Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil, por três modelos climáticos globais, conforme o cenário RCP 4.5

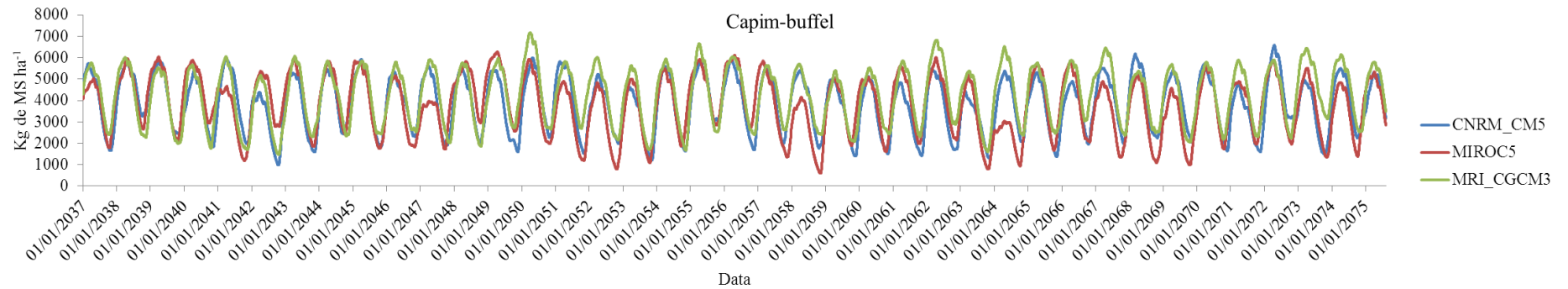
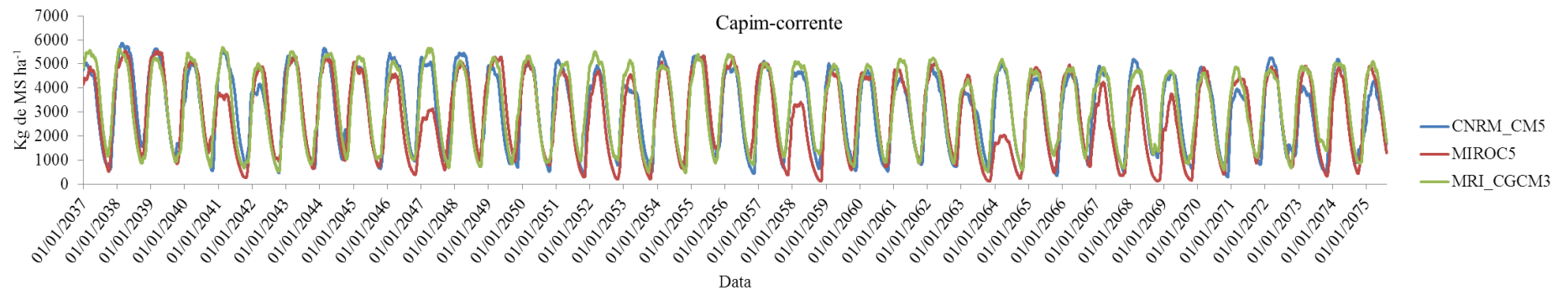


Figura 40 - Simulação do impacto das mudanças climáticas na produtividade do capim-corrente em Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil, por três modelos climáticos globais, conforme o cenário RCP 4.5



ANEXO A - MEMÓRIA DE CÁLCULO DOS COMPONENTES DO “DIAGRAMA DO FLUXO DE ÁGUA DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO PECUÁRIO EM AMBIENTE SEMIÁRIDO”.

Este anexo trata-se da relação dos componentes do modelo, descrito conforme sua elaboração no *software* Vensim PLE™, portanto, alguns termos serão descritos em inglês (idioma utilizado pelo programa). As variáveis do modelo estão dispostas em ordem alfabética onde é destacado o nome, o valor ou equação e alguma informação adicional quando for pertinente:

(01) Água para uso animal=
 (Pastagem natural*0)+(Espécie ou raça*0)+(Palmal*0)+(Feno*0)+(Gestação*0)+(Lactação*0)+(Ração*0)+(Silagem*0)+(Temperatura*0)
 Units: m³

(02) Água para uso humano=
 200.75
 Units: m³
 ONU: 110 L/dia/pessoa = 110 * 5 pessoas * 365 dias/1000:

(03) Água para usos diversos=
 100.375
 Units: m³
 Metade do volume utilizado em “Água para uso humano”

(04) Área=
 10000
 Units: ha

(05) Capacidade do reservatório=
 6481
 Units: m³
 Volume do reservatório = Volume: altura (H)*superfície do espelho de água em m² (S)/2,70 que é forma média dos açudes (MOLLE e CADIER, 1992).

Referência: manual do pequeno açude $((2.5*7000)/2.7) = 6481$

(06) Escoamento=

$((\text{Capacidade do reservatório}) * \text{Precipitação}) / 1000 * 0.5$

Units: m^3

(07) Espécie ou raça=

1.25

Units: m^3

ovinos: 3,42 L/dia; caprinos: 2,31 L/dia (ALVES et al., 2007)

Ovinos $(3.42*365)/1000 = 1.25\text{m}^3$

Caprinos $(2.31*365)/1000 = 0.84 \text{m}^3$

Bovinos $(75*365)/1000 = 27.3 \text{m}^3$

(08) Evaporação e infiltração=

$\text{Reservatório} * (\text{Taxas de evaporação e infiltração} / 100)$

Units: m^3

(09) Feno=

1

Units: Variável conceitual

(10) Fezes=

Água para uso animal*0

Units: Variável conceitual

(11) FINAL TIME = 30

Units: Year

Tempo de simulação.

(12) Forrageira cultivada=

$(\text{Precipitação} * 0)$

Units: m^3

Irrigação da palma forrageira com uma lâmina de 7,5 mm a

cada 14 dias (PEREIRA et al., 2015) por 7 meses (LOPES et al., 2017) = 1050m^3 ;

(13) Gestação=

1

Units: Variável conceitual, o consumo de água na gestação adicionado na variável:
Espécie ou raça

(14) INITIAL TIME = 0

Units: Year

Tempo inicial para a simulação.

(15) Lactação=

1

Units: Variável conceitual

(16) Leite=

Água para uso animal*0

Units: Variável conceitual

(17) Palmal=

(Área+Forrageira cultivada)*0

Units: **undefined**

(18) Pastagem natural=

Precipitação

Units: Variável conceitual

(19) Precipitação=

RANDOM WEIBULL(0,1e+012,2.6453,0,476,0)

Units: mm

(20) Ração=

1

Units: Variável conceitual

(21) Reservatório=
INTEG (Escoamento-Evaporação e infiltração-Vertedouro-Usos,0)

Units: m³

(22) Respiração e transpiração=
Água para uso animal*0

Units: Variável conceitual

(23) SAVEPER =
TIME STEP

Units: Year [0,1]

(24) Silagem=

1

Units: Variável conceitual

(25) Taxas de evaporação e infiltração=
40

Units: m³

OLIVEIRA, 2017) = 45%;

(LEÃO et al., 2013) = 31,4 a 56,9%,

(ARAÚJO e PIEDRA, 2009) = 55%

(26) Temperatura=

1

Units: Variável conceitual

(27) TIME STEP = 1

Units: Year [0,1]

(28) Urina=

Água para uso animal*0

Units: Variável conceitual

(29) Usos=

Forrageira cultivada+Água para uso animal+Água para uso humano+Água para usos diversos

Units: m³

(30) Vertedouro=

IF THEN ELSE(Reservatório>Capacidade do reservatório,Precipitação,0)

Units: m³