**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Eficiência da produção da pastagem e potencial de intensificação da
pecuária bovina no estado de São Paulo: instrumentos para avaliação e
proposição de políticas públicas**

Marcela Almeida de Araújo

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

**Piracicaba
2018**

Marcela Almeida de Araújo
Bacharela em Ciências Econômicas

**Eficiência da produção de pastagem e potencial de intensificação da pecuária
bovina no estado de São Paulo: instrumentos para avaliação e proposição de
políticas públicas**

versão revisada de acordo com a resolução CoPG 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **GERD SPAROVEK**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Araújo, Marcela Almeida de

Eficiência da produção de pastagem e potencial de intensificação da pecuária bovina no estado de São Paulo: instrumentos para avaliação e proposição de políticas públicas / Marcela Almeida de Araújo. -- versão revisada de acordo com a resolução CoPG 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

113 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Modelo de cultura 2. Eficiência produtiva 3. *Yield gap* 4. Programa ABC I.
Título

DEDICATÓRIA

Aos meus maiores exemplos de amor e vida: Milton Araújo e Dirce de Araújo (em memória),

dedico.

AGRADECIMENTOS

A minha família, pais, irmãs, sobrinhos (as), pelo apoio incondicional, amor e paciência os quais me dedicaram e por serem a principal motivação para o alcance de mais esse sonho.

Ao Diego Pequeno pelo suporte imenso na preparação das bases de dados, nas simulações, sugestões e enorme paciência ao longo de todo esse processo. Muito grata por tudo, Diego!

A equipe do Grupo de Políticas Públicas (GPP) e ao Laboratório de Geoprocessamento (Geolab), especialmente, ao meu orientador Gerd Sparovek e aos meus grandes mestres de trabalho e vida: Alberto Barretto, Rodrigo Maule, Sergio Paganini e Simone Ranieri pela confiança, apoio e principalmente pela oportunidade de concluir mais essa etapa.

Aos grandes amigos e parceiros de vida Leandro Almeida, Paulo Tavares, Thaís Baldassini, Victor Levartoski e Wanderson Sousa pela paciência, incentivo e amizade, os quais me fortaleceram com boas palavras e adorável companhia no decorrer de toda a caminhada. Sem vocês não seria possível.

Aos Professores Fábio Marin e Patrícia Menezes pela coorientação sobre a metodologia utilizada e características de crescimentos das pastagens, bem como as sugestões e disponibilidade de dados para a geração das simulações.

Agradeço por todo carinho e companheirismo àqueles que a ESALQ, FOP e GPP me deram a honra de conviver e aprender: Alice Brites, Aline Esteves, Ana Sbitkowski, Arthur Fendrich, Caroline Jardim, Daniel Miquelluti, Glêvia Camila, Gustavo Casoni, João Crivellaro, Maristela Lima, Sara Duarte, Pedro Soares e Zenilda Ledo.

Ademais ao CNPq pelo fomento e suporte durante os dois anos de mestrado.

EPÍGRAFE

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.”

Albert Einstein

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	13
1. INTRODUÇÃO GERAL	15
Referências	17
2. EFICIÊNCIA PRODUTIVA DAS PASTAGENS NO ESTADO DE SÃO PAULO: UMA EXTRAPOLAÇÃO DO MODELO <i>CROPGRO PERENNIAL FORAGE</i>	19
Resumo	19
Abstract	19
2.1 INTRODUÇÃO	20
2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.2.1 Produção Pecuária no Brasil	22
2.2.2 Produção Pecuária no estado de São Paulo	24
2.2.3 Modelagem de sistemas agrícolas	25
2.2.4 Conceito de Eficiência Produtiva	32
2.2.5 Extrapolação Espacial – Global Yield Gap	34
2.2.6 <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	36
2.3 MATERIAL E MÉTODOS	37
2.3.1 Protocolos projeto GYGA	37
2.3.2 Condições e dados de entrada para simulação da produtividade potencial e atingível	45
2.3.3 Modelo calibrado utilizado no estudo	52
2.3.4 Descrição dos dados de produtividade real	53
2.3.5 Estimativa da eficiência produtiva e yield gap explorável	55
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
2.4.1 Desempenho do CROPGRO Perennial Forage	56
2.4.2 Eficiência da produção de pastagem no estado de São Paulo	63
2.4.3 Incertezas e limitações	70
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
Referências	72

3. POTENCIAL DO USO DE MODELOS DE CULTURAS PARA DIRECIONAMENTO DE POLÍTICAS PÚBLICAS: UMA ANÁLISE ESPACIAL DA CONCESSÃO DO PROGRAMA ABC NO ESTADO DE SÃO PAULO.....	77
Resumo	77
Abstract	77
3.1 INTRODUÇÃO	78
3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	81
3.2.1 Intensificação sustentável da pecuária	81
3.2.2 – Plano ABC e Programa ABC	86
3.3 MATERIAL E MÉTODOS	89
3.3.1 Análise espacial da concessão de financiamento do Programa ABC	89
3.3.2 Eficiência da aplicação dos recursos do subprograma RPD do Programa ABC	90
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
3.4.1 Análise espacial do subprograma RPD do Programa ABC	93
3.4.2 Eficiência na aplicação dos recursos RPD: uma análise utilizando o conceito de <i>yield gap</i>	101
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	105
REFERÊNCIAS	106
4. CONCLUSÃO GERAL	109
APÊNDICES.....	113

RESUMO

Eficiência da produção de pastagem e potencial de intensificação da pecuária bovina no estado de São Paulo: instrumentos para avaliação e proposição de políticas públicas

Em um contexto global de aumento da demanda por produtos agrícolas, especialmente de proteína animal, concomitante às mudanças climáticas e escassez de áreas para expansão agrícola, o processo de intensificação sustentável da pecuária é colocado como um importante “piloto” frente às políticas públicas setoriais. O Plano ABC, exemplo deste tipo de política pública, destina recursos através do Programa ABC para a recuperação de pastagens degradadas. A identificação de pastagens degradadas se dá através de indicadores de baixa produtividade da pecuária, principalmente pautados na baixa lotação animal. Esta premissa nem sempre é verdadeira, pois há áreas com baixa capacidade de suporte, em função de limitações físicas, mas que não se encontram necessariamente degradadas. A utilização de modelos biofísicos de crescimento de forragem é uma possível alternativa de abordagem à problemática, que pode auxiliar na identificação espacial de áreas onde a pecuária poderia se intensificar sem implicar em impactos ambientais, de modo a melhor direcionar políticas públicas que busquem estimular este processo. O objetivo deste estudo foi determinar para o estado de São Paulo a eficiência na produção e o *yield gap* (lacuna de produtividade) explorável da pastagem via modelagem mecanística para identificar as áreas com maior potencial de intensificação da pecuária e compará-las com a geografia de aplicação do crédito agrícola do Programa ABC para recuperação de pastagens degradadas. O estudo foi organizado da seguinte forma: a primeira parte (Capítulo 2) apresenta uma discussão acerca das áreas de pastagem com maior potencial de incremento de produtividade com base nas simulações no *CROPGRO Perennial Forage* para crescimento da pastagem de modo a definir a eficiência produtiva e os *yield gaps* da pastagem para o estado de São Paulo; a segunda parte (Capítulo 3) traz a análise de desempenho do Programa ABC em relação à aplicação desse recurso para recuperação de pastagem degradada (RPD), ou seja, avaliar se o crédito está sendo aplicado em regiões de maior potencial para incremento de produtividade, com base nos valores de *yield gap* explorável encontrados anteriormente. A eficiência média atual da produção de pastagens (razão entre produtividade real e produtividade atingível) encontrada via simulação no estado de São Paulo foi de 46,4% e um *yield gap* médio explorável de 5,8 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ de biomassa úmida. Estes resultados indicam que há um significativo espaço para incremento de produtividade das pastagens neste estado. A priorização de áreas de maior *yield gap* para intensificação pode contribuir para a redução da pressão por abertura de novas áreas de pastagem em locais com baixo potencial produtivo, áreas estas que podem ser ocupadas para produção agrícola ou para a regularização ambiental, evitando a expansão do desmatamento. O presente estudo buscou contribuir, através de resultados em escala estadual, para futuros estudos em escala nacional, mostrando que o uso de modelos mecanísticos como o *CROPGRO Perennial Forage* podem ser instrumentos de grande utilidade na avaliação e no direcionamento de políticas públicas condizentes com a construção de diretrizes para o desenvolvimento rural sustentável.

Palavras-chave: Eficiência produtiva; *Yield gap* explorável; Programa ABC; Modelagem mecanística

ABSTRACT

Efficiency of pasture production and potential of cattle raising intensification in the state of São Paulo: tools for evaluation and proposal of public policies

In a global context of increasing demand for agricultural resources, especially animal protein, combined with climate change and scarcity of areas for agricultural expansion, the process of sustainable intensification of livestock farming is placed as an important public policy issue. The ABC Plan, an example of this type of public policy, allocates resources through the ABC Program for the recovery of degraded pastures. The identification of degraded pastures occurs through indicators of low productivity of livestock, mainly based on low animal stocking (UA.ha^{-1}). This premise is not always true, as there are areas with low support capacity, due to physical limitations, but that are not necessarily degraded. The use of biophysical models of forage growth is an alternative approach to this problem, which may help in the spatial identification of areas where livestock could be intensified without environmental impacts, in order to guide public policies seeking to stimulate this process. The objective of this study was to determine pasture yield efficiency and yield gap for São Paulo State, using models to identify areas with the greatest potential for livestock intensification and compare them with the geography of the ABC program application. The study was organized as follows: the first part (Chapter 2) presents a discussion about pasture areas with the greatest potential for productivity increase, based on simulations in CROPGRO Perennial Forage for the growth of *Brachiaria brizantha* cv Marandu in order to define the productive efficiency and the yield gaps of the pasture for São Paulo State; the second part (Chapter 3) presents the performance analysis of the ABC Program in relation to the application of this resource for degraded pasture recovery (RPD), i.e., to evaluate if the credit is being applied in regions with greater potential for productivity increase, based on the explorable yield gap values previously found. The current average efficiency of pasture production (ratio between real productivity and attainable productivity) found by simulation in São Paulo State was 46.4% and an average yield gap of $5.8 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{year}^{-1}$. These results indicate that there is a significant space to increase pasture productivity in this State. Prioritization of areas with a higher yield gap for intensification may contribute to the reduction of pressure for opening new pasture areas in areas with low productive potential, areas that can be occupied for agricultural production or for environmental regulation, avoiding the expansion of deforestation. The present study sought to contribute, through statewide results, to future studies on a national scale, showing that the use of mechanistic models, such as CROPGRO Perennial Forage, can be very useful for evaluating and directing public policies aimed at rural sustainable development.

Keywords: Productive efficiency; *Yield gap*; ABC Program; Mechanistic modeling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução das áreas de pastagem e do rebanho bovino no Brasil com base nos Censos Agropecuários 1985/1996/2006 (IBGE)	22
Figura 2. Taxa de lotação da pecuária bovina no Brasil para os anos de 2015 e 2016. Fonte: Elaboração própria com dados do LAPIG (2016) e IBGE (2015/2016).	23
Figura 3. Diagrama de base de dados, aplicação e componentes de software e respectivos usos com modelos de culturas para aplicação no DSSAT (adaptado de JONES et al., 2003).	28
Figura 4. Diferentes níveis de produção e seus respectivos fatores determinantes/limitantes. a) Produtividade potencial (Y_p) de culturas sem limitação hídrica (Y_w para culturas de sequeiro) e seus respectivos fatores determinantes são determinados pela radiação solar, regime térmico e duração do ciclo de cultivo. O <i>yield gap</i> representa a diferença entre a produtividade explorável (70% a 80% de Y_p ou Y_w) e a produtividade real (Y_r). Marin (2014) adaptado de van Ittersum et al. (2013).	33
Figura 5. Zonas climáticas homogêneas, com base na soma térmica acumulada, índice de aridez e sazonalidade. Áreas de mesma cor indicam condições no meio físico homogêneas. Adaptado por Marin (2014) de van Wart et al. (2013).	36
Figura 6. Protocolos do Projeto GYGA para análise de <i>yield gap</i> . Fonte: Grassini, 2017 adaptado de Grassini et al. & van Bussel et al. (2015).	38
Figura 7. Distribuição espacial das zonas climáticas homogêneas no Brasil conforme van Wart et al. (2013).	40
Figura 8. Distribuição espacial das áreas de pastagens no Brasil, conforme Lapig (2016).	41
Figura 9. Distribuição espacial das áreas de pastagens no estado de São Paulo, conforme Lapig (2016)	42
Figura 10: Zonas climáticas homogêneas selecionadas para simulação com base nas estações meteorológicas para o estado de São Paulo.	42
Figura 11. Histórico e distribuição diária dos dados de temperatura máxima em °C para Votuporanga, Catanduva, Presidente Prudente e São Carlos, respectivamente, para um período de 30 anos.	48
Figura 12. Histórico e distribuição diária dos dados de Temperatura mínima em °C para Votuporanga, Catanduva, Presidente Prudente e São Carlos, respectivamente, para um período de 30 anos.	49
Figura 13. Histórico e distribuição diária dos dados de Precipitação em mm para Votuporanga, Catanduva, Presidente Prudente e São Carlos, respectivamente para um período de 30 anos.	50
Figura 14. Histórico e distribuição diária dos dados de Radiação em MJ.m ² para Votuporanga, Catanduva, Presidente Prudente e São Carlos, respectivamente para um período de 30 anos.	51
Figura 15. Média mensal de Produtividade Atingível e Produtividade Potencial para as regiões de simulação em um período de 30 anos.	57

Figura 16. Histórico dos valores diários simulados para o acúmulo de forragem (kg.ha^{-1}), índice de área foliar (LAI) e peso da folha para a *Brachiaria brizantha* colhida a cada 28 dias durante o período de 1986 a 2016 para a estação meteorológica de Votuporanga e respectiva zona climática homogênea.. 59

Figura 17. Histórico dos valores diários simulados para o acúmulo de forragem (kg.ha^{-1}), índice de área foliar (LAI) e peso da folha para a *Brachiaria brizantha* colhida a cada 28 dias durante o período de 1986 a 2016 para a estação meteorológica de Catanduva e respectiva zona climática homogênea..... 60

Figura 18. Histórico dos valores diários simulados para o acúmulo de forragem (kg.ha^{-1}), índice de área foliar (LAI) e peso da folha para a *Brachiaria brizantha* colhida a cada 28 dias durante o período de 1986 a 2016 para a estação meteorológica de Presidente Prudente e respectiva zona climática homogênea. 61

Figura 19. Histórico dos valores diários simulados para o acúmulo de forragem (kg.ha^{-1}), índice de área foliar (LAI) e peso da folha para a *Brachiaria brizantha* colhida a cada 28 dias durante o período de 1986a 2016 para a estação meteorológica de São Carlos e respectiva zona climática homogênea. 62

Figura 20. Distribuição espacial da taxa de lotação (UA/ha) das pastagens no estado de São Paulo com base nos dados de rebanho bovino entre 2007 a 2016, gerados a partir do Levantamento Municipal da Pecuária (PPM – IBGE). 64

Figura 21. Produção de forragem simulada do tratamento 3: cultivo em sequeiro e com adução anual de $50 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ por um período de 30 anos. 65

Figura 22: Distribuição dos valores de eficiência produtiva entre as quatro regiões de simulação no estado de São Paulo: Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e Votuporanga..... 68

Figura 23: Distribuição dos valores de *yield gap* explorável (em $\text{kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$) entre as quatro regiões de simulação no estado de São Paulo: Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e Votuporanga..... 69

Figura 24. Representação teórica da composição dos grupos ou classes territoriais elaboradas a partir da dinâmica entre *yield gap* explorável (Yg) e a aplicação dos recursos do subprograma RPD do Programa ABC..... 92

Figura 25. Distribuição de número de contratos, volume de crédito e área dos contratos do subprograma RPD no Brasil no período de janeiro de 2013 a abril de 2017. 94

Figura 26: Distribuição de número de contratos, volume de crédito e área dos contratos do subprograma RPD no estado de São Paulo no período de janeiro de 2013 a abril de 2017. 95

Figura 27. Número total de contratos, área (ha) e volume crédito (R\$) de concessão de financiamento para Recuperação de Pastagem Degradada (RPD) do Programa ABC por município no estado de São Paulo (01/2013 a 04/2017) 97

Figura 28. Distribuição de número de contratos, volume de crédito e área dos contratos destinados a melhoramento das explorações e para formação de pastagem inseridos no subprograma RPD no estado de São Paulo para o período de janeiro de 2013 a abril de 2017..... 98

Figura 29. Número total de contratos, área (ha) e volume crédito (R\$) de concessão de financiamento para Recuperação de Pastagem Degradada (RPD) para a finalidade Melhoramento das explorações + formação de pastagem por município no estado de São Paulo (01/2013 a 04/2017)..... 100

Figura 30. Distribuição espacial da aplicação do crédito RPD para as modalidades melhoramento das explorações + formação de pastagem no municípios que compoe as quatro regiões do estado de São Paulo: Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e Votuporanga. 102

Figura 31. Resultado espacial dos grupos ou classes territoriais de desempenho na aplicação dos recursos para recuperação de pastagem degradada com base no *yield gap* explorável em quatro regiões do estado de São Paulo: Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e Votuporanga..... 104

Figura 32. Resultado espacial dos grupos ou classes territoriais de desempenho na aplicação dos recursos para recuperação de pastagem degradada com base no *yield gap* explorável dos municípios inseridos nas quatro regiões analisadas do estado de São Paulo: Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e Votuporanga..... 105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação da zona climática homogênea para cada ponto de simulação no estado de São Paulo e área de pastagem cultivada nas respectivas zonas climáticas.....	43
Tabela 2. Tipos de solo predominante para cada ponto de simulação, selecionados conforme sua zona climática homogênea no estado de São Paulo.....	43
Tabela 3: Características requeridas pelos modelos de simulação de culturas, de acordo com os protocolos do Projeto GYGA.....	44
Tabela 4: Parâmetros utilizados nos arquivos de espécie, cultivar e ecótipo no modelo <i>CROPGRO Perennial Forage</i>	46
Tabela 5. Produtividade real, atingível e potencial, eficiência de produção e <i>yield gap</i> explorável da pastagem nas quatro regiões selecionadas e valores ponderados para o estado (em Mg. ha ⁻¹ .ano ⁻¹)....	67
Tabela 6. Soluções sugeridas por (Foley, et al. 2011) para o sistema de produção agrícola mundial e sua adaptação à realidade das pastagens brasileiras	83
Tabela 7. Grupos de desempenho na aplicação dos recursos do Programa ABC para o subprograma Recuperação de Pastagem Degradada (RPD) para quatro regiões do estado de São Paulo.....	103

1. INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento populacional mundial estimado para as próximas décadas, somado a um cenário de moderado avanço econômico, tende a elevar significativamente a demanda por produtos agropecuários, especialmente os de proteína animal, exigindo crescentes ganhos de produtividade e eficiência na produção ou, ainda, ampliação da área explorada (GODFRAY et al., 2010; LICKER et al., 2010).

Entender e orientar a alteração no uso da terra para atender as necessidades por alimentos e outros produtos demandados por essa crescente população é um desafio para a sustentabilidade global, especialmente considerando a escassez de terras para a expansão da produção agrícola e os aspectos relacionados à mudança do clima (TILMAN et al., 2011; MARIN et al., 2016).

De acordo com essa projeção de demanda por produtos agropecuários, cada hectare de terra cultivada existente, portanto, teria que produzir em patamares substancialmente superiores aos níveis de produtividade atuais. Entretanto, algumas regiões no globo têm um potencial muito maior do que outras para suportar incrementos de produtividade de forma sustentável, devido ao clima favorável, à qualidade do solo e, em alguns casos, ao acesso à irrigação (VAN ITTERSUM et al., 2013). Além disso, algumas dessas regiões possuem atualmente uma produtividade média baixa, consequentemente, com potencial para incremento.

Com o maior estoque de gado bovino mundial (ABIEC, 2016) ainda alocado, predominantemente em sistemas extensivos de produção, o Brasil apresenta potencial para a adoção de um modelo de produção de baixa emissão de carbono e preservação de ecossistemas naturais (STRASSBURG et al., 2014).

A melhoria dos sistemas de produção da pecuária brasileira, via recuperação das áreas de pastagens degradadas e intensificação da produção, é abalizada como uma oportunidade para aumentar a eficiência de uso destas áreas de pasto, permitindo a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e possibilitando a liberação de áreas para a regularização ambiental (cumprimento do Código Florestal) ou para a produção agrícola, minimizando, com isso, a competição por terras entre a agricultura e os ecossistemas naturais.

Nesta acepção, existe toda uma visão, refletida em políticas públicas, de que a intensificação da pecuária no Brasil é necessária, por questões ambientais, sociais e de segurança alimentar. Esse movimento defende que, caso se pretenda expandir as áreas agrícolas com baixo impacto ambiental, o país deve passar por uma agenda de intensificação na pecuária (DE OLIVEIRA SILVA et al., 2016, 2017; MARIN et al., 2016).

Neste contexto, políticas públicas visando a redução do desmatamento e a implementação de tecnologias de mitigação de emissões de GEE e sequestro de Carbono estão sendo propostas no país, em especial aquelas que impulsionam a intensificação dos sistemas de produção. O Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa

Emissão de Carbono na Agricultura – Plano ABC - iniciou um conjunto de iniciativas para a adoção de práticas que buscam melhores resultados no balanço de emissões pela agropecuária nacional (BRASIL, 2011). Além disso, seguindo indicações deste plano setorial, a linha de crédito Programa ABC oferece recursos que financiam a aplicação de práticas de baixo carbono, entre elas, a linha para recuperação de pastagens degradadas (RPD).

Entretanto, além do movimento de intensificação requerer inovações nos sistemas produtivos nos estabelecimentos rurais, nas cadeias produtivas e nos territórios, não existe um consenso sobre onde esse processo deve ocorrer espacialmente (BARRETTO et al., 2013) para que seja possível um maior ganho de eficiência.

Uma intensificação sustentável da pecuária demanda pela identificação de regiões com maior potencial para aumentar a produção de forragem e propiciar uma taxa de lotação animal superior aos níveis atuais, ou ainda identificar as áreas que estão no seu limite produtivo e mesmo assim com baixa produtividade, por consequência, sem espaço para incrementos de produtividade, as quais poderiam ser aproveitadas para um processo de regularização ambiental via restauração da vegetação nativa, por exemplo.

Uma possível abordagem à problemática é a utilização de modelos biofísicos de crescimento de forragem para auxiliar na identificação espacial de áreas onde a pecuária poderia se intensificar. Com isso, o foco da análise passaria de uma identificação de pastagens degradadas para a definição de áreas com yield gap (lacunas de produtividade), ou seja, áreas passíveis de intensificação em que a produtividade do pasto se encontra abaixo do seu potencial biofísico, considerando as condições de solo, clima, relevo, genética da planta, etc.

A simulação do crescimento de pastagens e de produção de biomassa vem sendo utilizada através de uma série de abordagens metodológicas, especialmente com o uso de modelos biofísicos (ANDRADE et al., 2016).

Considerando a carência de estudos que realizaram uma extrapolação espacial das áreas passíveis de intensificação da produção através da utilização de modelos mecanísticos para simulação de crescimento de forrageiras tropicais, exceto estudos de calibração dos modelos, o objetivo deste estudo é determinar, pioneiramente, para o estado de São Paulo, a eficiência na produção de pastagem via modelagem e com isso, buscar identificar as áreas com maior potencial de intensificação da pecuária e compará-las com a geografia de aplicação de crédito agrícola para recuperação de pastagens.

Entre os objetivos específicos deste estudo estão: (i) identificar as áreas de pastagem com maior potencial de incremento de produtividade com base em um modelo biofísico (Modelagem Mecanística) de crescimento da *Brachiaria brizantha* cv Marandu para definição dos *yield gaps* (lacunas de produtividade) da pastagem; e (ii) verificar se o volume de crédito liberado para recuperação de pastagem degradada (RPD) do Programa ABC está sendo aplicado em regiões de maior aptidão para incremento de produtividade, com base nos valores dos *yield gaps*, analisando assim, a eficácia desta política pública

O presente estudo busca contribuir, através da adaptação e aplicação da metodologia de modelagem espacial e obtenção de resultados em escala estadual, para futuros estudos em escala nacional, de tal modo que o uso desta metodologia possa auxiliar na avaliação e no direcionamento de políticas públicas condizentes com a construção de diretrizes para o desenvolvimento rural sustentável, seja possibilitando que áreas liberadas pelo setor pecuário sejam utilizadas para agricultura, seja evitando a expansão do desmatamento, ou para o próprio aumento de eficiência do setor pecuário, além de contribuir para modelos econômicos de projeções quanto a demanda por alimentos e dinamismo dos preços no mercado.

O modelo utilizado neste estudo foi o CROPGRO perennial forage, um modelo mecanístico de predição de crescimento das forragens com base nos dados da planta, do solo, do clima e do manejo utilizado para a produção (PEQUENO, 2014) e que foi calibrado para as forrageiras tropicais, especialmente a *Brachiaria brizhanta* cv Marandu. Este modelo é suportado na Plataforma DSSAT, do inglês Decision Support System for Agrotechnology Transfer, um software que inclui modelos de simulação para mais para de 42 culturas, bem como ferramentas que auxiliam no uso efetivo de tais modelos.

Referências

- ABIEC, Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes. Perfil da Pecuária no Brasil. **Relatório Anual 2016**, p. 46, 2016. Disponível em: <<http://abiec.siteoficial.ws/images/upload/sumario-pt-010217.pdf>>.
- ANDRADE, A. S.; SANTOS, P. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; DE ARAUJO, L. C.; PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S.; MARIN, F. R.; LARA, M. A. S. Simulating tropical forage growth and biomass accumulation: An overview of model development and application. **Grass and Forage Science**, v. 71, n. 1, p. 54–65, 2016.
- BARRETTO, A. G. O. P.; BERNDES, G.; SPAROVEK, G.; WIRSENIUS, S. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: An analysis of the 1975-2006 period. **Global Change Biology**, v. 19, n. 6, p. 1804–1815, 2013.
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para Consolidação da Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – PLANO ABC. Brasília, 2011. Disponível: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/download.pdf>>. Acesso em: fevereiro de 2017.
- DE OLIVEIRA SILVA, R.; BARIONI, L. G.; HALL, J. A. J.; FOLEGATTI MATSUURA, M.; ZANETT ALBERTINI, T.; FERNANDES, F. A.; MORAN, D. Increasing beef production could lower greenhouse gas emissions in Brazil if decoupled from deforestation. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 5, p. 493–497, 2016.

- DE OLIVEIRA SILVA, R.; BARIONI, L. G.; HALL, J. A. J.; MORETTI, A. C.; FONSECA VELOSO, R.; ALEXANDER, P.; CRESPOLINI, M.; MORAN, D. Sustainable intensification of Brazilian livestock production through optimized pasture restoration. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 201–211, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.001>>.
- GODFRAY, H. C. J.; BEDDINGTON, J. R.; CRUTE, I. R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J. F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S. M.; TOULMIN, C. Food Security : The Challenge of. v. 327, n. February, p. 812–818, 2010.
- LICKER, R.; JOHNSTON, M.; FOLEY, J. A.; BARFORD, C.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; RAMANKUTTY, N. Mind the gap: How do climate and agricultural management explain the “yield gap” of croplands around the world? **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, n. 6, p. 769–782, 2010.
- MARIN, F. R. .; PILAU, G. P. .; SPOLADOR, H. F. S. .; OTTO, R. .; PEDREIRA, C. G. S. Intensificação sustentável da agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. Ano XXV, n. 3, p. 108–124, 2016.
- PEQUENO, D. N. L. Universidade de São Paulo. **Agronomic performance and adaptation of the CROPGRO - Perennial Forage Model to predict growth of three tropical forage grasses under irrigated and rainfed conditions**. Piracicaba, 2014.
- STRASSBURG, B. B. N.; LATAWIEC, A. E.; BARIONI, L. G.; NOBRE, C. A.; DA SILVA, V. P.; VALENTIM, J. F.; VIANNA, M.; ASSAD, E. D. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, n. 1, p. 84–97, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001>>.
- TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 50, p. 20260–20264, 2011. Disponível em: <<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1116437108>>.
- VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>>.

2. EFICIÊNCIA PRODUTIVA DAS PASTAGENS NO ESTADO DE SÃO PAULO: UMA EXTRAPOLAÇÃO DO MODELO *CROPGRO PERENNIAL FORAGE*

Resumo

A fim de garantir a segurança alimentar do novo contingente de pessoas, de acordo com o crescimento populacional projetado para as próximas décadas, avanços tecnológicos e rearranjos produtivos no setor agropecuário são demandados, especialmente para a sustentabilidade global. De acordo com essa projeção cada hectare de terra cultivada existente teria que produzir em patamares substancialmente superiores aos níveis de produtividade atuais. A análise de eficiência produtiva e de *yield gap* explorável pode auxiliar na identificação de regiões com maior ou menor potencial para incremento de produtividade. A pecuária brasileira, uma das mais relevantes no cenário mundial em termos de efetivo animal e valor exportado, ocupa uma ampla proporção das terras no país e apesar dos esforços e ganhos de produtividade alcançados pelo setor, ainda observa-se um baixo desempenho produtivo, especialmente em relação ao seu desempenho potencial, além de contribuir, significativamente para emissão de gases de efeito estufa. Diante disso, o presente capítulo buscou estimar a eficiência produtiva e o *yield gap* explorável das áreas de pastagem para quatro regiões do estado de São Paulo via modelagem mecanística e com um método de extrapolação espacial proposto no Projeto GYGA identificou as áreas com maior ou menor potencial de intensificação da pecuária em termos de produção de forragem. A eficiência da produção de pasto no estado de São Paulo é atualmente de 46,4%, correspondendo a *yield gap* explorável médio de 5,8 Mg. ha⁻¹.ano⁻¹. Este cenário apresenta perspectivas para um caminho de intensificação mais sustentável da pecuária no estado, haja vista uma priorização de áreas de maior *yield gap* explorável. O modelo CROPGRO Perennial Forage apresentou desempenho satisfatório para as simulações de longo prazo e pode ser um importante instrumento para avaliação e direcionamento de políticas públicas que busquem o aumento de eficiência do setor pecuário, concomitante ao desenvolvimento rural sustentável.

Palavras-chave: Eficiência produtiva; *Yield gap* explorável; Pastagem; Extrapolação espacial

Abstract

In order to guarantee the food security for future populations, according to the projected growth rates over the coming decades, the agricultural sector needs technological advances and changes in productive systems with a focus on sustainability. According to projections, each hectare of existing farmland would need to sustainably increase production levels. Production efficiency and yield gap analyses can help identify regions that have greater or lesser capacities to increase production. The Brazilian livestock industry, one of the most important in the world in terms of effective livestock and export value, occupies a large proportion of the country's land and despite the efforts and productivity gains achieved by the sector, there is still a low productive performance, especially in relation to its potential performance and in addition to contributing significantly to the emission of greenhouse gases. Therefore, the present chapter sought to estimate the productive efficiency and yield gap of areas of pasture for four regions of the state of São Paulo through mechanistic modeling and the spatial extrapolation method proposed in the GYGA Project in order to identify the areas with greater or lesser potential

for intensification of livestock production. The efficiency of pasture production in the state of São Paulo is currently 46.4%, corresponding to an average yield of 5.8 Mg. ha⁻¹. This scenario presents perspectives for a more sustainable intensification path of cattle production in São Paulo, given the prioritization of areas with a higher yield gap. The CROPGRO Perennial Forage model presented satisfactory performance for the long-term simulations and could be an important instrument for evaluating and directing public policies that seek to increase the efficiency of the livestock sector and for sustainable rural development.

Keywords: Productive efficiency; Yield gap exploitable; Pasture; Spatial extrapolation

2.1 Introdução

A demanda por produtos agropecuários, especialmente os de proteína animal, exigirá nas próximas décadas ganhos de produtividade e eficiência na produção ou ampliação da área explorada. Orientar a alteração no uso da terra para atender essas necessidades é um desafio para a sustentabilidade global (TILMAN et al., 2011; MARIN et al., 2016).

O processo de intensificação e aumento da eficiência na pecuária é colocado como uma “solução chave” para a demanda por expansão agrícola e redução da pressão para abertura de novas áreas para pastagem, uma vez que o país apresenta atualmente vastas áreas de bovinocultura de corte em sistema extensivo, com potencial para adoção de um modelo de produção de baixa emissão de carbono e preservação de ecossistemas naturais (STRASSBURG et al., 2014).

No entanto, é necessária uma investigação minuciosa sobre o futuro uso da terra no Brasil dada a complexa relação entre aumento de produção e uso da terra, ou seja, os efeitos da intensificação dependem das atividades agropecuárias a serem intensificadas e de onde, espacialmente, esse processo deve ocorrer (BARRETTO et al., 2013).

Neste contexto, uma intensificação sustentável da pecuária demanda por uma identificação de regiões com maior potencial para aumentar a produção de forragem e sustentar uma taxa de lotação superior aos níveis atuais, ou ainda identificar as áreas que estão no seu limite produtivo e já com baixa produtividade, apresentando, portanto, baixo potencial de intensificação.

Os modelos biofísicos de crescimento de cultura, neste caso de forrageiras, apresentam uma possível abordagem à problemática, de modo a auxiliar na identificação espacial de áreas onde a pecuária poderia se intensificar. Tal abordagem permite, portanto, criar um tratamento alternativo ao processo de identificação de pastagens degradadas, possibilitando, então, que a análise seja direcionada para a definição de áreas passíveis de intensificação, ou seja, áreas em que a produtividade do pasto se encontra abaixo do seu potencial biofísico, considerando as condições de solo, clima, relevo, genética da planta, entre outros fatores.

Sistemas pecuários em pastagens são complexos e as interações entre os animais, as plantas e o meio ambiente existem em vários níveis de complexidade (PEQUENO, 2014). Ainda assim, a simulação do crescimento de pastagens e de produção de biomassa, decorrente de uma série de abordagens metodológicas, tais como o uso de modelos de culturas, possibilitam uma análise de eficiência produtiva, ou, alternativamente, *yield gap*, de determinada cultura. A diferença entre a produtividade potencial ou atingível e a produtividade real dos agricultores, denominado *yield gap*, é um importante componente do planejamento estratégico da segurança alimentar em escala regional, nacional e global, dado que fornece uma estimativa do quanto é possível aumentar na capacidade de produção de alimentos em determinado local (VAN WART et al., 2013).

Nesta perspectiva, o objetivo deste capítulo é apresentar e discutir a utilização de um modelo biofísico para determinar a eficiência na produção de pastagem e realizar uma extrapolação espacial das áreas com maior potencial de intensificação da pecuária para o estado de São Paulo, ou seja, com maiores gaps de produtividade, haja vista a carência de estudos que abordam a utilização de modelos mecanísticos para simulação de crescimento de forrageiras tropicais que permitam uma extrapolação espacial. A eficiência produtiva dos pastos foi estimada pela diferença ou razão entre a produtividade real (Y_w) das áreas de pastagem e a produtividade potencial (Y_p) – ou aquela produtividade que pode ser atingível (Y_w), tendo apenas o fator hídrico como limitante (MARIN, 2014).

Entre os objetivos específicos deste capítulo estão: (i) identificar a produtividade potencial e atingível das pastagens no estado de São Paulo, com base em um modelo biofísico (Modelagem Mecanística) de crescimento da *Brachiaria brizantha* cv Marandu (popularmente conhecida como “braquiário” ou “capim-marandu”), a qual é amplamente utilizada em pastagens plantadas, representando aproximadamente 80% da área total de pastagens cultivadas no Brasil (FONSECA; MARTUSCELLO; FARIA, 2006); (ii) estimar a produtividade real das pastagens no estado de São Paulo; e (iii) calcular a eficiência produtiva das pastagens de acordo com a definição dos *yield gaps*.

O modelo utilizado neste estudo é o *CROPGRO Perennial Forage*, um modelo mecanístico, desenvolvido por Rymph (2004) a partir de uma versão agrícola anual do CROPGRO para predição de crescimento das forragens, que utiliza como base dados da planta, do solo, do clima e do manejo utilizado para a produção. Este modelo foi calibrado para as forrageiras tropicais, especialmente a *Brachiaria brizantha* cv Marandu (PEDREIRA et al., 2011; PEQUENO, 2014; PEQUENO; PEDREIRA; BOOTE, 2014). O modelo *CROPGRO Perennial Forage* pode ser usado para simular o crescimento do capim-marandu sob condições irrigadas e de sequeiro segundo resultados de calibrações de Pequeno (2014). Além disso, este modelo foi inserido no código do Sistema de Modelos de Culturas e lançando em 2017 na Plataforma DSSAT versão 4.7, do inglês Decision Support System for Agrotechnology Transfer, um software que inclui modelos de simulação para mais de 42 culturas, bem como ferramentas que auxiliam no uso efetivo de tais modelos (DSSAT, 2017).

2.2 Revisão bibliográfica

2.2.1 Produção Pecuária no Brasil

Com o maior estoque comercial de gado bovino mundial (13,8% do rebanho global)(ABIEC, 2017) e sendo o maior exportador de carne bovina (USDA, 2018), o Brasil ainda concentra na atividade pecuária, apesar dos ganhos de produtividade dos últimos anos, externalidades negativas, tais como o uso de uma grande quantidade de recursos naturais e a contribuição para o aquecimento global (ALMEIDA, 2010), através de emissões de gases de efeito estufa (GEEs).

A **Figura 1** mostra a evolução das áreas de pastagens (naturais e plantadas) no Brasil e o efetivo do rebanho bovino em três décadas, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Figura 1. Evolução das áreas de pastagem e do rebanho bovino no Brasil com base nos Censos Agropecuários 1985/1996/2006 (IBGE)

O Censo Agropecuário de 2006, portanto, aponta que as pastagens ocupavam aproximadamente 160 milhões de hectares nesta época, o que representa mais de 2 vezes a área ocupada com cultivos agrícolas no Brasil no mesmo período.

Passados mais de uma década desde o último Censo, observa-se que o setor da pecuária de corte brasileiro ainda apresenta baixos níveis de produtividade se comparado aos demais players do mercado internacional, com uma porção significativa de terras alocada em sistema extensivo de produção, ocupando atualmente uma área total aproximada de 175 milhões de hectares (LAPIG, 2016) em geral localizadas em regiões de fronteira agrícola, padrão este muitas vezes vinculado aos impactos ambientais mencionados. De acordo com Strassburg (2014), o país apresenta-se aquém de sua produtividade potencial variando de 32 a 34%, com uma baixa taxa de lotação animal. Uma distribuição

espacial da taxa de lotação animal (Unidade animal/hectare) para os anos de 2015 e 2016 é apresentada na Figura 2.

Figura 2. Taxa de lotação da pecuária bovina no Brasil para os anos de 2015 e 2016. Fonte: Elaboração própria com dados do LAPIG (2016) e IBGE (2015/2016).

Este perfil predominantemente extensivo da pecuária, particularmente da bovinocultura de corte no Brasil, se deve à sua característica de implantação e condução, que não necessariamente está atrelada ao uso mais intensivo e eficiente de insumos, mão de obra e tecnologias, tanto para formação quanto manutenção da pastagem (DIAS-FILHO, 2015). Esse padrão de pecuária extensiva contribui para o processo de degradação das pastagens. Segundo Macedo e Zimmer (1993), a degradação das pastagens ocorre especialmente devido a manejos inadequados e é um processo evolutivo de perda do vigor, de níveis de produtividade e da capacidade natural de recuperação dos pastos para sustentar os níveis de lotação e qualidade demandada pelos animais, bem como de redução da capacidade de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e demais invasoras.

Essas características típicas de implantação e manejo das pastagens extensivas brasileiras, somadas à capacidade de autotransporte do gado, possibilitando seu estabelecimento em áreas com carência de infraestrutura (DIAS-FILHO, 2015), configuram a pecuária como o caminho “menos custoso” e “mais eficiente” para a ocupação territorial em áreas de fronteira agrícola (DIAS-FILHO, 2011), especialmente por produtores com maiores extensões de áreas.

Somado a tais características, a pecuária bovina brasileira é um dos setores que mais têm contribuído para emissão de GEEs, sendo responsável por cerca de 65% das emissões totais provenientes do setor agropecuário brasileiro (IMAFLOA, 2016), seja através da emissão dióxido de carbono (CO₂),

metano (CH_4) ou óxido nitroso (N_2O). Tais emissões advém, principalmente, do processo de fermentação entérica (característica dos ruminantes), manuseio de esterco, aplicações de fertilizantes nitrogenados e manejo dos solos (MAZZETTO et al., 2015).

A melhoria do sistema de produção da pecuária bovina é colocada como essencial para reduzir as emissões dessas fontes de emissões por unidade de produto (MAZZETTO et al., 2015), além de contribuir para a redução de taxas de desmatamento para abertura de novas áreas para pecuária e contribuir para aumentos nos estoques de carbono orgânico no solo (GOUVELLO, 2010). Neste aspecto, Gouvello et al. (2010) e Strassburg et al. (2014) estimaram que o aumento da produtividade da pecuária, atendendo à crescente demanda de carne bovina, ao menos até 2040, poderia liberar área necessária para a expansão de demais produtos agrícolas e de biocombustíveis em um cenário de quase zero desmatamento.

Vale ressaltar que ganhos de eficiência no sistema produtivo da pecuária adquiridos através de práticas como da recuperação de pastagem e de melhoria na nutrição animal são apontados por diversos estudos, a exemplo dos conduzidos pela Embrapa no Brasil, como medidas importantes na obtenção de um saldo positivo de carbono e de um melhor balanço dos GEE. Alguns sistemas de produção, como a integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF), e alterações na nutrição animal, como inclusão de aditivos na dieta bovina que melhoram a sua digestibilidade, têm potencial para diminuir as emissões de GEE.

2.2.2 Produção Pecuária no estado de São Paulo

O estado de São Paulo não se apresenta distante do panorama brasileiro, ou seja, a maior parte da bovinocultura de corte concentra-se em sistema extensivo de produção a base de pasto, e com percentual elevado de áreas degradadas. Segundo o Levantamento censitário das unidades de produção agropecuária do Estado de São Paulo – LUPA (SÃO PAULO, 2008), as áreas de pastos degradados no estado em 2008 se aproximavam de 40% das áreas totais de pastagens, sendo que atualmente a área estimada de pastagem neste estado é 6,12 milhões de hectares (LAPIG, 2016), o que sugere ainda a existência de um significativo volume de áreas em condições de degradação atualmente, se mantido o padrão de 2010.

No entanto, o estado vem desde o final da década de 1.990 buscando melhorias de eficiência no setor pecuário, especialmente através de incentivos para uma maior intensificação na pecuária de corte (CARRER et al, 2013). Esse processo de intensificação é apresentado como um meio de promover ganhos de produtividade e melhorias de qualidade dos produtos de origem animal, em um ambiente mais competitivo, onde há demandas institucionais por sustentabilidade na produção rural e segurança do alimento, além do surgimento de nichos de mercado que demandam maior qualidade e padronização na carne bovina. Com isso, aponta-se que este processo que ocorre principalmente por meio da adoção

de tecnologias de produção e gestão, também vem contribuindo para aumento da viabilidade econômica da atividade entre os pecuaristas.

Como parte dos incentivos para a intensificação da produção pecuária, vale destacar a importância de políticas públicas voltadas à recuperação de áreas degradadas que têm sido adotadas no estado, tais como o Plano ABC, com estimativa de recuperar aproximadamente 200 mil hectares de pastagens degradadas no estado e incentivar a adoção em 200 mil hectares de Integração Lavoura, Pecuária e Floresta (iLPF) até 2020 (SÃO PAULO, 2017). O Plano ABC, por meio do Programa ABC, vem disponibilizando recursos financeiros para viabilizar a aplicação de tais tecnologias nas propriedades. Destaca-se ainda o Projeto Integra São Paulo: Lavoura, Pecuária e Floresta, o qual foi lançado pelo governo do estado em 2013 com a meta de recuperar cerca de 312 mil hectares de pastagens no estado em um período de 8 anos (SÃO PAULO, 2013).

2.2.3 Modelagem de sistemas agrícolas

A modelagem de sistemas agrícolas tem sido considerada uma ferramenta altamente promissora no processo de compreensão das relações entre o solo, planta e demais componentes presentes nos sistemas, especialmente para estudar essas interações ao longo do tempo (PEDREIRA et al., 2011). Além disso, tais modelos desempenham papel importante quando utilizados como ferramentas de suporte à decisão para avaliação de alternativas de manejo adotadas nas propriedades agrícolas, ou ainda no melhor direcionamento de recursos, sejam para pesquisas agropecuárias ou desenvolvimento e intervenções no meio rural por meio de políticas públicas.

Neste sentido, a modelagem de sistemas agrícolas ou modelagem de culturas tem sido utilizada com sucesso na simulação da produtividade das culturas, a qual vem passando por significativos avanços desde a década de 1990, sobretudo em função dos aumentos de demanda por previsões mais precisas nos cenários de manejo, bem como da evolução de estudos a respeito de mudanças no clima e dos avanços na tecnologia da informação (DOURADO-NETO et al., 1998).

Os modelos permitem resumir um elevado volume de informações, facilitar a organização, interpretação e aplicação do conhecimento, além de poderem ser empregados como suporte à definição de políticas agrícolas, zoneamento agroclimático, modelagem de mudanças climáticas e planejamento de sistemas produtivos (ANDRADE et al., 2016). Essa inserção dos modelos como ferramenta nas tomadas de decisões está sendo possível devido, especialmente, pela necessidade de sistematizar o conhecimento acumulados ao longo do tempo (BARIONI et al., 2003).

De modo geral, tais modelos de culturas integram conhecimentos multidisciplinares, com base em processos relativos à física e química do solo, ao clima, à fisiologia e à genética das plantas, além do manejo e gestão adotados nas propriedades agrícolas.

Apesar do grande potencial de aplicação dos modelos de culturas, é essencial que os seus usuários sejam cautelosos em relação às limitações inerentes à modelagem, considerando a necessidade de avaliação de tempo-espaço-colheita e a mensuração de incertezas existentes (ANDRADE et al., 2016). A disponibilidade muitas vezes limitada de informações e dos conhecimentos envolvendo os processos físicos e fisiológicos atrelados ao crescimento das plantas é considerada uma das maiores limitações tanto para o desenvolvimento quanto para o aperfeiçoamento dos modelos de culturas (MARIN et al., 2014 *apud* ANDRADE et al., 2015), o que proporciona uma gama de oportunidades para novas frentes estudos na área.

Existem, essencialmente, dois grupos principais de modelos de simulação de culturas, os denominados empíricos e os mecanísticos (THORNLEY & JOHNSON, 2000). Modelos empíricos consistem em relações matemáticas descritas através da observação de dados que compõem um sistema, muitas vezes denominados “modelos estatísticos”, por relacionarem variáveis sem explicitarem os processos envolvidos (DOURADO-NETO et al., 1998). Apesar da maior simplicidade, eles podem ser, sem dúvida, extremamente úteis (THORNLEY & JOHNSON, 2000). Por outro lado, tem-se os modelos mecanísticos, comumente mais complexos do que os empíricos, que buscam representar relações de causa-efeito entre as variáveis (DOURADO-NETO et al., 1998) ou seja, consideram o conhecimento dos processos físicos, químicos e biológicos relacionados ao crescimento das plantas (ANDRADE et al., 2016).

Assim, enquanto um modelo empírico descreve o comportamento da planta baseado diretamente nas observações no nível da planta, um modelo mecanicista de crescimento de cultura descreve, com maior complexidade, o desempenho da planta baseado no conhecimento dos processos que estão ocorrendo em seu crescimento e desenvolvimento (DOURADO-NETO et al., 1998)

A utilização de modelos de simulação de culturas ainda é pequena na maioria das regiões tropicais e há uma carência de estudos que analisaram ou avaliaram a aplicação de modelos desenvolvidos ou adaptados para forrageiras tropicais, especialmente modelos mecanísticos (ANDRADE et al., 2016). A restrita compreensão de suas capacidades e limitações, a limitada experiência em calibrar, avaliar e usar esses modelos e até mesmo a baixa credibilidade dos modelos em áreas tropicais pode explicar parcialmente sua baixa utilização (MARIN & JONES, 2014 *apud* (ANDRADE et al., 2016). Apesar dessa carência, já se observa que a modelagem mecanística para apoio à decisão na pecuária brasileira é um tema de crescente interesse entre o meio acadêmico e os tomadores de decisões.

O estudo buscou identificar o potencial produtivo desta forrageira no estado de São Paulo para caracterizar os maiores e menores *yield gaps* da pastagem através da utilização de um modelo biofísico, ou seja, de um simulador dinâmico do crescimento e desenvolvimento da pastagem (*Brachiaria brizantha*), o *CROPGRO Perennial Forage*. Essa simulação ocorreu por meio da integração numérica dos processos biofísicos desta forrageira considerados no modelo com o apoio computational,

possibilitado por uma plataforma que contém este e outros diversos modelos de sistemas agrícolas, o DSSAT.

Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)

O Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT), ou, em português, “Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia”, tem sido globalmente utilizado nas últimas décadas por pesquisadores, estudantes, consultores e extensionistas. Esta plataforma incorpora atualmente modelos de 42 culturas em um software que facilita a avaliação e aplicação de tais modelos, que podem ser utilizados para os mais diversos objetivos e propósitos (DSSAT, 2017).

Os diversos modelos computacionais que simulam o crescimento de culturas agrícolas foram ao longo dos últimos anos sendo incorporados à plataforma DSSAT à medida que foram sendo desenvolvidos e calibrados, permitindo, assim, maior acessibilidade ao meio científico para o desenvolvimento de estudos, por exemplo, que avaliam possíveis impactos na agricultura decorrentes das mudanças climáticas ou ainda testam métodos de adaptação a essas mudanças (UNFCCC, 2016).

A estrutura do DSSAT é construída com uma abordagem modular, conforme descrito por Jones et al. (2003), onde há disponibilidade de diferentes opções para representar processos como a evapotranspiração e o acúmulo de matéria orgânica no solo (MOS), o que facilita o teste de diferentes representações de processos importantes no crescimento de uma cultura.

Como apontado por Marin (2014), entre as principais características do sistema DSSAT estão: (i) o fato de sua estrutura permitir separar os módulos por linhas disciplinares; (ii) as interfaces de cada módulo serem bem definidas; (iii) a facilidade de inserção ou remoção de componentes individuais sem comprometer o programa principal; (iv) a facilidade de manuseio de documentos e códigos; (v) programações desenvolvidas nas mais diversas linguagens podem ser nele acopladas; (vi) possibilita a integração de variados tipos de aplicações; (vii) viabiliza a integração com demais componentes (ex. pecuária e consórcio de culturas); e (viii) proporciona uma cooperação entre os diversos modelos de culturas, mesmo que individualmente sejam comportados em módulos específicos.

A Figura 3 representa a abordagem modular do DSSAT, onde o software contempla um programa principal, um módulo de unidade da terra e os módulos primários, como aqueles que são comumente compartilhados entre os diferentes modelos: clima (dados meteorológicos diários), manejo (como uso de fertilizantes e irrigação), solo (informações de superfície e perfil do solo), planta (características genéticas da variedade de cultivo a ser simulada) e componentes da interface solo-planta-atmosfera. Coletivamente, esses componentes descrevem as mudanças que ocorrem ao longo do tempo no solo e nas plantas, as quais ocorrem em resposta ao clima e ao manejo diário em uma unidade terrestre.

Figura 3. Diagrama de base de dados, aplicação e componentes de software e respectivos usos com modelos de culturas para aplicação no DSSAT (adaptado de JONES et al., 2003).

O módulo de manejo permite ao usuário definir as principais condições de simulação, atreladas principalmente ao preparo do solo (ex. mecanização), plantio, fertilização, irrigação e colheita. Para as simulações, o DSSAT considera o período antes do plantio, através da simulação de uma fase de pousio, e o período durante o plantio. Tais simulações são realizadas diariamente, porém em alguns casos, dependendo do processo e do modelo de cultura utilizado, essas simulações podem ocorrer de hora em hora. No final de um dia na simulação, o sistema apresenta um balanço atualizado sobre a planta e água do solo, os balanços de nitrogênio e carbono no solo, assim como o estágio de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura.

Para o módulo solo consideram-se as informações de superfície e perfil do solo, que se integram aos módulos “secundários”: dinâmica da água no solo, temperatura do solo e carbono e nitrogênio no solo. Neste módulo são encontradas atualmente duas abordagens que simulam o balanço hídrico: uma que considera o efeito de cobertura de solo em sistemas de plantio consorciado (“bidimensional”); e outra mais simplista, que considera uma única cultura em toda a área de plantio (cobertura horizontalmente homogênea ou “unidimensional”) e um perfil de solo constituído por camadas verticais (JONES et al., 2003; MARIN, 2014), esta segunda sendo a mais utilizada pela maioria dos modelos de culturas.

Os dados genéticos da cultura são também definidos em um arquivo específico da espécie, que contém as informações sobre o cultivar ou variedade, fornecidas pelo usuário.

Já o módulo solo-planta-atmosfera, como apresentado por Marin (2014), possibilita a estimativa da evapotranspiração, através da junção dos dados de entrada de solo, planta e atmosfera, de modo a computar a interceptação da radiação solar pela cultura e gerar um cálculo da transpiração

máxima da copa em conjunto com a evaporação do solo. Existem duas maneiras de calcular a evapotranspiração: a primeira pelo método de Priestley & Taylor (1972), utilizando somente radiação solar e temperatura (JONES & RITCHIE, 1991 *apud* MARIN, 2014); a segunda pelo método Penman-FAO, que calcula a evapotranspiração potencial exigindo dados de umidade do ar e velocidade do vento e, de modo geral apresentando melhores resultados para regiões áridas ou com muito vento (DOORENBOS & PRUITT, 1977 *apud* MARIN, 2014).

Os modelos de cultura do DSSAT incluem um módulo para simular a matéria orgânica do solo (MOS) e a dinâmica de uma camada de resíduos no solo, com duas opções: o modelo PAPRAN (GODWIN; JONES, 1991; SELIGMAN; VAN KEULEN, 1988 *apud* PEQUENO, et al., 2014) e o modelo CENTURY (PARTON et al., 1988 *apud* PEQUENO, et al., 2014). As duas opções utilizam a mineralização da MOS, bem como a imobilização, nitrificação e desnitrificação do N, entretanto, as principais diferenças entre elas são que o módulo baseado no CENTURY: (i) divide a MOS em mais frações, cada uma com uma relação C: N variável e pode mineralizar ou imobilizar nutrientes, (ii) permite a simulação de uma camada de resíduo sobre o solo e o movimento dos nutrientes do perfil do solo e (iii) a taxa de decomposição da matéria orgânica é dependente da textura do solo. Portanto, o modelo CENTURY foi vinculado aos modelos DSSAT por Gijsman et al. (2002), porque é mais flexível no manejo de diferentes sistemas agrícolas, incluindo a decomposição de resíduo vegetal durante a estação e a massa de raízes/rizomas/estolões, além disso, o PAPRAN gera uma omissão da quantidade de nutrientes na liteira o que pode reduzir significativamente a quantidade de N e C disponível solo, potencializando resultados numa sub-predição do crescimento da planta, especialmente nas simulações de vários anos, típicos de sistemas de forragens tropicais (PEDREIRA, 2009).

O sistema DSSAT permite combinar bases de dados de culturas, clima e solo com modelos de culturas e programas de aplicação para simular resultados plurianuais de estratégias de manejo de culturas. Integrando os atributos edafoclimáticos, da cultura e as opções de manejo, o DSSAT permite que os usuários efetuem questões do tipo "e se", fazendo experimentos de simulação em um computador, o que leva um tempo consideravelmente inferior se comparado ao tempo que um profissional de ciências agrárias consumiria se fosse realizar experimentos em tempo real no campo.

Com o DSSAT também é possível comparar saídas dos modelos de culturas (resultados simulados) com dados experimentais (resultados observados). Esse procedimento é bastante importante antes de qualquer utilização de um modelo de cultura para fins de planejamento e direcionamento de políticas públicas, por exemplo. A avaliação do modelo de produção é realizada através da entrada dos dados mínimos pelo usuário, da execução do modelo e da comparação das saídas com os dados observados. Além disso, a funcionalidade do DSSAT contempla uma interface com outros softwares, como o GIS (Geographic Information Systems) para análise espacial dos dados.

Para a simulação de crescimento de forrageiras tropicais, o sistema DSSAT na sua versão 4.7, disponibilizada em novembro de 2017, apresenta o modelo *CROPGRO Perennial Forage*, o qual passou

por calibrações para algumas espécies forrageiras no Brasil, especialmente a *Brachiaria brizantha* cv Marandu.

CROPGRO Perennial Forage

O CROPGRO é um modelo mecanístico, incluído no sistema DSSAT, que prediz o crescimento e a composição morfológica das culturas com base em dados de solo, de processos fisiológicos das plantas, do manejo utilizado na sua produção e do clima (BOOTE et al., 1998). Este modelo pode ser utilizado para inúmeras aplicações, uma vez que possibilita a simulação do balanço de água e nitrogênio no solo, da dinâmica da matéria orgânica (MOS) e de resíduos do solo, além dos danos causados por pragas e doenças nas plantas (JONES et al., 2003 *apud* PEQUENO, 2014).

O modelo CROPGRO é considerado genérico por utilizar o mesmo código em linguagem FORTRAN para prever o crescimento de diversas leguminosas. Com isso, o modelo utiliza arquivos de entrada que definem alguns atributos para representar diferenças genéticas entre espécies e cultivares, ou seja, seu principal objetivo é ser um modelo facilmente adaptável para simular o crescimento de diversas culturas (PEDREIRA, 2009).

Desenvolvido nos primórdios da década de 1990, o CROPGRO funcionava de maneira autônoma, mas com a possibilidade de ser trabalhado dentro da plataforma DSSAT, permitindo que fosse ligado a outro programa de modelagem de culturas, assim como a programas de gráficos para automatizar a apresentação dos resultados (ICASA, 1998 *apud* PEDREIRA, 2009).

O código do CROPGRO foi reorganizado em uma estrutura modular assim que a versão 3.1 do DSSAT foi liberada em 1996, de modo a permitir que o usuário incluísse um novo código ou conectasse o código a outros programas. Com isso, o código para simular processos diferentes da planta e solo foi organizado em sub-rotinas individuais para cada processo e além disso, essa versão modular permitiu a inclusão do módulo da simulação de matéria orgânica no solo (MOS) baseado no Modelo CENTURY (PEDREIRA, 2009).

O modelo CROPGRO em sua versão “anual” foi adaptado em 1995 para simular o crescimento da forrageira bahiagrass (*Paspalum notatum* Flugge) na Flórida (USA), a qual era cultivada como integrante de um sistema de rotação de culturas com amendoim (KELLY, 1995). Em 1998 esta versão foi utilizada também para simular o crescimento da *Brachiaria Decumbens* cultivar Basilisk na região da Colômbia, a qual foi parametrizada por Giraldo et al. (2001).

Posteriormente, os arquivos de espécies, cultivares e ecótipos desenvolvidos neste processo de parametrização foram lançados como modelos de "pastagem" no sistema DSSAT em sua versão 3.5 (ICASA, 1998 *apud* PEQUENO, 2014a). No entanto, segundo Rymph et al. (2004), quando considerados os meses mais frios do ano, tais versões "anuais" do modelo não eram confiáveis, especialmente para a predição de matéria seca, em parte devido a limitações do código que não considerava a dormência do inverno ou a total e rápida rebrota após a colheita da forragem.

Com isso, uma nova versão “perene” do modelo era necessária, a qual foi possível com Rymph et al., (2004), que adicionaram ao modelo “anual” um novo código para criar um modelo “perene” mais confiável para simular o crescimento da forrageira bahiagrass, incluindo um algoritmo para o órgão de armazenamento permanente (rizoma/estolões), o que permite uma melhor representação da reservas de carbono (C) e nitrogênio (N) e, conseqüentemente, para os padrões de rebrota, mesmo depois de uma completa desfoliação ou morte da parte aérea da planta exposta a condições de inverno. Além disso, como apontado por Pequeno (2014a), esse novo código, ao propiciar uma melhor estimativa da rebrota e da concentração de N nos tecidos da *Paspalum notatum*, considera melhor a variação diária do clima, de fertilização e de manejo da cultura.

Com modelo de forragem *CROPGRO Perennial Forage* previamente calibrado para bahiagrass (Rymph, 2004), uma sequência de estudos propiciou sua adaptação para simular o crescimento e a composição de diferentes espécies forrageiras tropicais, tais como *Panicum*, a *P. maximum* cv. Tanzânia (LARA et al., 2012), *Brachiaria*, a *B. cv Xaraés* (PEDREIRA et al., 2011), *Brachiaria brizantha* cv Marandu (PEQUENO et al., 2014) e *B. brizantha* cv. Mulato II (PEQUENO, 2014). As calibrações para a *Brachiaria* possuem considerável relevância, uma vez que é uma forrageira tropical de grande importância econômica em muitos sistemas forrageiros-pecuários tropicais, especialmente no Brasil.

Tais estudos apontam que o modelo *CROPGRO Perennial Forage* com as adaptações realizadas pode ser utilizado para simular o crescimento de forrageiras com uma acurácia aceitável, pois efetivamente integraram o conhecimento sobre as forrageiras (ANDRADE et al., 2014). Além disso, os resultados alcançados por Pequeno (2014) sugerem que é possível aplicar este modelo para diferentes espécies de gramíneas tropicais com esforço mínimo de parametrização, especialmente para aquelas do mesmo gênero.

Com isso, de acordo com Pequeno et al. (2014), é possível simular com precisão o crescimento e a produção de forragem do capim-marandu sob condições irrigadas e de sequeiro considerando a versão de *Brachiaria brizantha* do modelo *CROPGRO Perennial Forage* adaptado para a cultivar Xaraés de Pedreira et al. (2011). Entre os principais resultados e observações desses autores estão: (i) as simulações utilizando o método Penman-Monteith FAO 56 deram respostas de estresse hídrico mais realistas do que o método de Priestley e Taylor quando em situação de sequeiro; (ii) houve uma modificação dos parâmetros de particionamento do modelo de *B. brizantha* para fornecer mais haste e armazenamento por longos períodos de rebrota; (iii) houve a parametrização da concentração de nitrogênio através de dados de campo, porém observa-se que há necessidade de ajustes no código para melhorar a precisão dessa previsão; (iv) houve melhorias nos parâmetros relativos à temperatura, fotoperíodo e radiação solar nos processos fotossintéticos, além do aperfeiçoamento para aumentar o particionamento e o ciclo de mobilização durante o recrescimento.

2.2.4 Conceito de Eficiência Produtiva

Tendo em vista o aumento de demanda global por proteína animal e sabendo que o Brasil é um importante consumidor e fornecedor de carne bovina, é necessário salientar que a escassez de terras aptas para expansão da produção de forragem e os possíveis impactos dessa expansão para o clima podem influenciar negativamente o avanço das áreas de pastagens para produção animal no país. Apesar dos esforços da pesquisa, o atual baixo desempenho produtivo desta atividade demonstra baixa eficiência da produção animal em pastos, sendo, portanto, importante a reflexão sobre o melhor direcionamento de ações para um processo de intensificação da produção de forragem.

Considerando esses impactos, o caminho alternativo de melhorar a produtividade das terras já cultivadas torna-se prioridade (LICKER et al., 2010), especialmente através do fechamento das maiores lacunas de produtividade, ou seja, em regiões com maiores *yield gaps* – onde há maior espaço entre produtividade real das culturas e a que elas potencialmente podem alcançar perante as condições biofísicas. Entretanto, como observa Nueumann et al. (2010), em uma escala global, poucas informações estão disponíveis sobre a distribuição espacial das diferenças de produtividade agrícola e do seu potencial de intensificação. Os autores citam três razões principais para esta falta de informação: (i) há pouca referência consistente sobre os fatores que impulsionam a intensificação agrícola e, no geral, há uma abundância de fatores que podem variar local ou regionalmente; (ii) há pouca informação registrada quanto ao manejo do solo e das culturas; e (iii) há baixa disponibilidade de dados que permitam o melhor uso de modelos de simulação de culturas, especialmente para estimativas de produtividade potencial.

Apesar das limitações encontradas, observa-se em Marin (2014) que, com base na análise da eficiência produtiva, tornou-se possível a identificação das áreas com maior potencial para incremento de produtividade, e por consequência, há como mapear áreas prioritárias para intensificação da produção. Segundo o autor, entre as vantagens do mapeamento de tais áreas estão: (i) a possibilidade de melhor direcionamento de recursos que podem ser aplicados na pesquisa, desenvolvimento ou intervenção de políticas públicas; (ii) a contribuição para a análise de impactos relacionados às mudanças do clima, bem como para a simulação de cenários futuros para as culturas e uso do solo; e (iii) a capacidade de gerar dados de entrada para modelos econômicos de equilíbrio geral e parcial, o que possibilita a criação de projeções futuras relacionadas a segurança alimentar e uso da terra.

A fim de buscar um melhor direcionamento de ações e áreas prioritárias para a intensificação de pastagens, o presente trabalho considerou as definições de produtividade potencial, produtividade atingível e produtividade real. A produtividade real considera o quanto realmente é produzido de forragem nas pastagens de modo a suportar a lotação animal atual em determinada região produtora. Ou seja, a produtividade real (Y_r) é aquela alcançada de fato em condições reais de produção e para sua estimativa é importante que o número de anos utilizados abarque um período suficientemente longo para considerar a variabilidade climática, portanto, não confundindo os efeitos temporais relacionados às tendências de produtividade com ganhos tecnológicos (VAN ITTERSUM et al., 2013). A produtividade

potencial (Y_p) é aquela atingida por um genótipo adaptado sob condições ótimas de cultivo, sem qualquer fator limitante (água) ou redutor (pragas, doenças, nutrientes) ao seu crescimento. Já a produtividade atingível (Y_w) é aquela alcançada por um genótipo adaptado sob condições reais de cultivo, com influência desfavorável de um ou mais fatores limitantes (água) ou redutores (pragas, doenças, nutrientes) ao seu crescimento.

Segundo Ittersum et al. (2013), há uma similaridade entre a definição de Y_w e Y_p , uma vez que ambas são definidas por tipos de culturas, cultivares, clima, solo e disponibilidade de água, podendo apresentar alta variabilidade dentro de uma região. Além disso, uma e outra são estimadas para as melhores datas de plantio e semeadura, densidade populacional e variedades. No entanto, é improvável que um número significativo de produtores atinja a perfeição no manejo do solo e das culturas de modo a alcançar Y_p ou Y_w , uma vez que a resposta produtiva aos insumos aplicados segue retornos decrescentes quando a produção agrícola se aproxima de uma produtividade máxima (KONING et al., 2008; LOBELL et al., 2009 *apud* van ITTERSUM et al. 2013). Também pode haver imprevistos capazes afetar as produtividades, como altas temperaturas, chuvas variáveis, ventos fortes, etc.

O conceito de eficiência produtiva e de *yield gap*, origina-se da compreensão das definições de produtividade agrícola e resulta da razão ou diferença, respectivamente, estabelecida entre a produtividade real (Y_a), observada em condições reais, e a produtividade potencial (Y_p) para culturas irrigadas, ou ainda da produtividade atingível limitada apenas por deficiência hídrica (Y_w) para culturas em sequeiro (van ITTERSUM et al., 2013).

Já o *yield gap* explorável (Y_g), o máximo de incremento de produtividade real que um produtor pode alcançar, é menor do que o *yield gap* (Y_w ou Y_p) (van ITTERSUM & RABBINGE, 1997 *apud* van ITTERSUM et al., 2013), tendo em vista que as produtividades reais agrícolas tendem a estabilizar quando atingem 75-85% de Y_p ou Y_w . A Figura 4 mostra uma representação esquemática desses parâmetros críticos.

Figura 4. Diferentes níveis de produção e seus respectivos fatores determinantes/limitantes. a) Produtividade potencial (Y_p) de culturas sem limitação hídrica (Y_w para culturas de sequeiro) e seus respectivos fatores determinantes são determinados pela radiação solar, regime térmico e duração do ciclo de cultivo. O *yield gap* representa a diferença entre a produtividade explorável (70% a 80% de Y_p ou Y_w) e a produtividade real (Y_r). Marin (2014) adaptado de van Ittersun et al. (2013).

A aplicação desse conceito da eficiência produtiva para pastagens pode auxiliar a adoção de diferentes estratégias envolvendo o setor pecuário, em especial o melhor direcionamento de políticas públicas que destinam recursos para o processo de intensificação do setor, tais como linhas de crédito para recuperação de pastagens degradada, de modo a definir as regiões como maior aptidão para incremento de produtividade com base nas condições biofísicas para o desenvolvimento dos pastos.

2.2.5 Extrapolação Espacial – *Global Yield Gap*

Segundo van Wart et al. (2013), a análise de *yield gap* explorável (Yg) ou eficiência produtiva, diferença entre a produtividade potencial (para produção irrigada) ou atingível (sequeiro) e a produtividade real dos agricultores, é um importante componente do planejamento estratégico pra a segurança alimentar em escalas regional, nacional e global, dado que fornece uma estimativa quantitativa do potencial de aumento na capacidade de produção das culturas em determinado local.

Neste sentido, como apontado anteriormente, modelos de culturas estão sendo desenvolvidos e calibrados com o objetivo, dentre outros, de contribuir para análise de *yield gap*. Entretanto, tais modelos demandam por dados específicos e confiáveis da localidade, tais como época de semeadura, maturidade da cultivar, população de plantas, solos e clima etc., e esses dados geralmente não estão disponíveis na maioria das localidades (RAMIREZ-VILLEGAS & CHALLINOR, 2012 *apud* van WART et al., 2013).

Por essa razão, um método de upscaling¹ é considerado necessário para ampliar a cobertura de estimativas de Yp e Yw com base em informações de determinada localização de modo a utilizar uma extrapolação espacial apropriada, através da adoção de um protocolo que minimiza o número de pontos para as simulações. Com isso, os domínios de extrapolação, idealmente, deveriam ser pequenos o suficiente para minimizar a variação do clima e das práticas de manejo adotadas nas culturas, e grandes o suficiente para minimizar o conjunto de dados requeridos para estimar o Yg em escalas regional e nacional (VAN WART et al., 2013).

Na revisão de van Wart et al. (2013), observa-se que no processo de extrapolação uma região pode ser dividida em zonas agroclimáticas (CZs) ou zonas agroecológicas (AEZs). As CZs são fundamentadas na homogeneidade das variáveis climáticas que têm maior influência no crescimento e produtividade das culturas, enquanto as AEZs são definidas como regiões geográficas com clima e solos similares para a agricultura.

Os métodos para elaboração do zoneamento podem ser colocados, essencialmente, em duas categorias: matriz e cluster. Segundo van Wart et al. (2013), em um zoneamento de matriz, cada variável

---

¹ Métodos de aumento de escala ou de homogeneização que buscam agrupar os detalhes observados em escalas pequenas sobre diferentes parâmetros em uma escala maior (mais grosseira), de modo a preservar o comportamento observado nas menores escalas. Geralmente aplicados para gerar uma extrapolação de resultados obtidos com modelos de simulação.

utilizada para delinear as zonas é dividida em classes ou intervalos de classe que podem ser definidos com base na opinião de especialistas ou em distribuições de frequência dos valores da variável. Com isso as zonas são formadas pelas “células” da matriz das classes em interseção. Por outro lado, os zoneamentos em cluster baseiam-se em análises estatísticas multivariadas para dividir as células em um número especificado pelo pesquisador, ou seja, esse processo envolve essencialmente a atribuição de valores de célula derivados da modelagem matemática ou estatística de variáveis categóricas.

Entre os exemplos de extrapolação espacial citados por van Wart et al. (2013) está o projeto Atlas Global de *Yield Gap* (GYGA), do inglês *The Global Yield Gap and Water Productivity Atlas* (GYGA), o qual faz uso de zoneamento por matriz e é adotado no presente estudo. Para extrapolar os resultados, o GYGA utiliza uma abordagem de zoneamento híbrido denominado extrapolação de domínio GYGA (GYGA-ED), com base no uso de três variáveis, a saber: graus-dia de crescimento (GDD), sazonalidade de temperatura (dado pelo desvio padrão de temperatura média mensal) e um índice de aridez (calculado pela precipitação total/evapotranspiração de referência total).

O principal objetivo do projeto GYGA é estimar o *yield gap* para as principais culturas alimentares em todos os países produtores com base em dados observados localmente, ou seja, com uma abordagem bottom up (de baixo para cima). O desafio de usar uma abordagem de bottom up é o tempo, o custo e o acesso aos dados meteorológicos observados, bem como a informações sobre rotações de culturas, propriedades do solo e manejo agrícola, que são necessárias para estimativas robustas de Y_p e Y_w associadas a uma localização específica (van ITTERSUM et al., 2013).

A abordagem GYGA busca minimizar o número de pontos específicos para simulação, gerando, consequentemente, zonas climáticas mais homogêneas. Por sua vez, dentro de uma zona climática espera-se que as opções de tecnologia de manejo de culturas e solo funcionem de forma similar porque as condições biofísicas que regem a resposta do sistema de culturas são suficientemente homogêneas. Um mapa das zonas climáticas homogêneas para o globo, adaptado por Marain (2014) de van Wart et al. (2013), é apresentado pela Figura 5.

Figura 5. Zonas climáticas homogêneas, com base na soma térmica acumulada, índice de aridez e sazonalidade. Áreas de mesma cor indicam condições no meio físico homogêneas. Adaptado por Marin (2014) de van Wart et al. (2013).

A abordagem adotada pelo projeto GYGA é empregada no presente estudo e para análise das pastagens no estado de São Paulo considera-se a escolha de regiões representativas em termos de área de pastos no estado, conforme mapa de pastagens do Lapig (2016). Com isso, adotando o zoneamento utilizado por van Wart (2013), assume-se que as áreas selecionadas para simulação são homogêneas quanto ao clima e ao solo e, portanto, tendem a apresentar sistemas de produção e meio físico similares, permitindo a extrapolação das simulações pontuais para uma escala mais ampla (MARIN, 2014).

2.2.6 *Brachiaria brizantha* cv. Marandu

A *Brachiaria brizantha* cv Marandu, popularmente conhecida como “Brachiarão” ou “capim-marandu”, é uma das gramíneas forrageiras mais utilizadas em todo o Brasil (PEQUENO, 2014), ocupando aproximadamente 80% das áreas de pastagens plantadas no país (FONSECA, et al., 2006), e se concentram especialmente no Brasil central. A expressividade desse número retrata a hegemonia desta cultivar na pecuária brasileira (EMBRAPA, 2017). Isso porque possui boa adaptabilidade a condições climáticas e pedológicas diversas, além da sua alta resistência a pragas e doenças.

As gramíneas do gênero *Brachiaria* tiveram origem na África tropical, região que possui significativa semelhança com as condições edafoclimáticas do Brasil. Por isso, em 1984 foi introduzida no país após passar pelo processo de avaliação da Embrapa Gado de Corte e Embrapa Cerrados (CRUZ, 2010). Entre as principais características avaliadas para esta forrageira estão a resistência às cigarrinhas-

das-pastagens (por seu colmo possuir alta pilosidade, o que dificulta o ataque da praga), boa formação de biomassa, alta capacidade de rebrota e tolerância ao frio, à seca e ao fogo. A *Brachiaria* se desenvolve melhor em solos bem drenados, de média a alta fertilidade, onde produz de 8 a 20 toneladas de matéria seca por hectare no ano (EMBRAPA, 2017)

A forrageira do cultivar Marandu, em média, possuem ciclos perenes e demandam por uma precipitação pluviométrica de 500mm anuais. O formato de crescimento ocorre através da formação de touceiras cesptosas (pontiagudas), podendo atingir alturas que variam em média de 1 a 1,5 metros. Além disso, são gramíneas que se adaptam bem em consórcios com leguminosas e são boas opções para produtores que almejam formação de pastejo ou até mesmo a produção de feno, uma vez que sua digestibilidade e palatabilidade são tidas como muito boas.

Neste sentido, este cultivar foi selecionado neste estudo para compor as simulações de seu crescimento no *CROPGRO Perennial Forage* por ser o mais representativo tipo de forragem utilizado.

2.3 Material e Métodos

2.3.1 Protocolos projeto GYGA

O principal objetivo deste capítulo é mensurar a eficiência produtiva (*yield gap*) das áreas de pastagem no estado de São Paulo e para o alcance deste propósito adotou-se os protocolos definidos no projeto GYGA (<http://www.yieldgap.org/>).

Como apontado por van Wart et. al (2013), os protocolos considerados na abordagem GYGA buscam, primeiramente, minimizar o número de pontos para simulação, gerando, consequentemente, zonas climáticas mais homogêneas, onde espera-se que as condições quanto ao solo e ao clima tendam a apresentar-se suficientemente homogêneas. Uma ilustração dos protocolos GYGA é apresentado na Figura 6, conforme Grassini (2017).

Figura 6. Protocolos do Projeto GYGA para análise de *yield gap*.
 Fonte: Grassini, 2017 adaptado de Grassini et al. & van Bussel et al. (2015).

Os protocolos do projeto foram aqui adotados para a simulação da produtividade potencial (Y_p) e atingível da pastagem (Y_w), especificamente a *Brachiaria*, de modo a permitir a redução do número de pontos para simulação, considerando as limitações de obtenção de dados e a complexidade de processamento do modelo *CROPGRO Perennial Forage*, e a extrapolação dessas simulações, estendendo a cobertura espacial.

A seguir são listados os procedimentos utilizados neste estudo:

Definição da zona climática homogênea: o primeiro procedimento adotado foi, conforme descrito por van Wart et. al. (2013), a definição das zonas climáticas homogêneas (CZs). O mapa de CZs foi reproduzido com base na combinação matricial do mapa (shapefile) de três variáveis categóricas estimadas no projeto GYGA, que considera a superfície terrestre coberta por pelo menos uma das principais culturas alimentares do globo. Para evitar a inclusão de áreas com produção muito baixa foram consideradas apenas os grids onde a soma da área colhida das principais culturas fosse maior do que 0,5% da área do grid.

As variáveis categóricas utilizadas são: graus dias (GDD), sazonalidade da temperatura e índice anual de aridez (AI). Os GDD foram calculados conforme apresentados em Licker et al. (2010) com:

$$GDD = \sum_{i=1}^{365} \max(0, T_i - T_b)$$

Onde a T_i é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para cada dia do ano e T_b é a temperatura de base (0°C para os cálculos dos autores).

A sazonalidade de temperatura foi obtida pelos autores do WorldClim (~ 1950-2000) e Bioclim4. Já os valores anuais do índice de aridez (AI) foram extraídos do CGIAR-CSI (<http://www.cgiar-csi.org/data/global-aridity-and-pet-database>), calculado como:

$$AI = \frac{MAP}{MAE}$$

Onde MAP é a precipitação média anual (mm) e MAE a evapotranspiração potencial média anual (mm). Os autores agregaram os valores de AI a um grid de 5 minutos, com uma média espacial de 100 células de 30 arcsegundos de resolução, e, posteriormente, multiplicou-se a média de AI especializado por 10000.

Com o shapefile das três variáveis categóricas definidas pelos autores, foi possível através do software ArcGis® 10.5 gerar uma combinação matricial dessas variáveis e então reproduzir o mapa de zonas climáticas homogêneas para o Brasil (Figura 7) e, posteriormente, para o estado de São Paulo, objeto de estudo.

Figura 7. Distribuição espacial das zonas climáticas homogêneas no Brasil conforme van Wart et al. (2013).

(ii) Seleção das estações meteorológicas conforme maior representatividade da pastagem: o segundo procedimento, a partir do mapa de zonas climáticas homogêneas de van Wart (2013), foi selecionar as estações meteorológicas que contemplam as regiões com maior representatividade de área de pastagem cultivada no estado de São Paulo. Para isso, através do software ArcGis® 10.5 foi realizada uma interseção entre o mapa de zonas homogêneas do estado de São Paulo e o mapa de pastagens cultivadas da base de dados do Laboratório de Processamento de Imagens e SIG da Universidade Federal de Goiás (Araújo et al., 2017) - Lapig inserido no portal pastagem.org, (http://maps.lapig.iesa.ufg.br/?layers=pa_br_areas_pastagens_250_2016_lapig). Foram também inseridos pontos das estações meteorológicas identificadas com base nos dados adquiridos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

O mapa de pastagem do Lapig considera um total de 175.396.874 hectares de áreas mapeadas no Brasil, seja através da interpretação visual de imagens do Landsat-8 ou de mapas públicos, compondo mapeamento do Bioma Pantanal pelo Mapeamento da Bacia do Alto Paraguai para 2014; o Bioma Caatinga do Mapeamento Lapig na sua segunda versão (2014-2016), o qual classificou as áreas de pasto limpo, pasto sujo e área degradada como solo exposto; o Bioma Mata Atlântica do Mapeamento do Mapeamento Lapig na sua segunda versão (2014-2016), o qual classificou as áreas de pasto limpo, pasto sujo e área degradada como solo exposto; o Bioma Pampa do Mapeamento realizado pelo IBGE para o RS (2012); o Bioma Amazônia do Mapeamento TerraClass Amazônia 2014 e o Bioma Cerrado do Mapeamento TerraClass Cerrado 2013. A seguir é apresentada a distribuição espacial das áreas de pastagem no Brasil (Figura 8) e no estado de São Paulo (Figura 9), conforme shapefile do Lapig (2016).

Figura 8. Distribuição espacial das áreas de pastagens no Brasil, conforme Lapig (2016).

No caso do estado de São Paulo, objeto deste estudo, o mapeamento do Lapig registra um total de 6.121.523 hectares de pastagens cultivadas. Com isso, as simulações levaram em conta a seleção do menor número possível de pontos que considera a localização de estações meteorológicas, de acordo com a respectiva zona climática homogênea, de modo a selecionar regiões para simulação com uma fração significativa da área total de pastagem cultivada no estado.

Figura 9. Distribuição espacial das áreas de pastagens no estado de São Paulo, conforme Lapig (2016)

O resultado foi a seleção de 4 pontos para simulação, Figura 10 e Tabela 1, que somados representam no contingente de suas respectivas CZs uma fração de 76,2% de toda área de pasto cultivado neste estado, atendendo, portanto, a um dos protocolos do Projeto GYGA que exige que ao menos 75% das áreas cultivadas sejam consideradas para maior eficácia dos resultados.

Figura 10: Zonas climáticas homogêneas selecionadas para simulação com base nas estações meteorológicas para o estado de São Paulo.

Tabela 1. Classificação da zona climática homogênea para cada ponto de simulação no estado de São Paulo e área de pastagem cultivada nas respectivas zonas climáticas.

Localização	Lat. (°)	Long. (°)	Zonas Climáticas Homogêneas			Área de Pastagem na zona climática (ha)
			Soma térmica (GDD)	Aridez	Sazonalidade	
Votuporanga	-20,41	-49,98	8	5	1	1.574.636
Presidente Prudente	-22,11	-51,38	7	5	1	1.303.197
Catanduva	-21,11	-48,93	7	6	1	1.301.154
São Carlos	-21,96	-47,86	7	7	1	521.651
Total da área						4.700.640
Total da área São Paulo						6.121.523
Fração da área considerada						76,8%

(ii) **Seleção dos dados de solo para simulação e organização de dados climáticos:** com os pontos de simulação selecionados, o próximo passo foi organizar os dados climáticos provenientes das estações para cada um dos quatro pontos e em seguida os dados de perfis de solo, descritos no item 2.3.2. Os parâmetros do solo, segundo o projeto GYGA, devem ser obtidos a partir dos mapas de solo existentes e dos parâmetros do modelo de simulação de culturas ou, se disponíveis, mapas nacionais, sendo que apenas as combinações de sistemas de cultivo versus tipo de solo mais importantes são consideradas. Com isso, para esse estudo, gerou-se um buffer de 100 km ao entorno de cada um dos pontos selecionados, com base na localização de cada estação meteorológica, e, com a utilização do mapa de solos do Brasil publicado pela Embrapa Solos, foi possível verificar o tipo de solo predominante para cada região de simulação (haja vista o buffer de 100 km). Foram então considerados os seguintes tipos de solos: Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico típico para os pontos Catanduva, Presidente Prudente e Votuporanga e o Latossolo Vermelho Amarelo álico, textura média para São Carlos, conforme aponta a Tabela 2.

Tabela 2. Tipos de solo predominante para cada ponto de simulação, selecionados conforme sua zona climática homogênea no estado de São Paulo

Localização	Lat. (°)	Long. (°)	Zonas Climáticas Homogêneas			Solos tipo predominante
			Soma térmica (GDD)	Aridez	Sazonalidade	
Votuporanga	-20,41	-49,98	8	5	1	Argissolo Verm. Amarelo
Presidente Prudente	-22,11	-51,38	7	5	1	Argissolo Verm. Amarelo
Catanduva	-21,11	-48,93	7	6	1	Argissolo Verm. Amarelo
São Carlos	-21,96	-47,86	7	7	1	Latossolo Verm. Amarelo

(iv) **Produtividade potencial (Yp) e atingível (Yw):** segundo o projeto GYGA a simulação de Yp e Yw deve ser feita de modo a considerar cada sistema de cultivo versus o tipo de solo predominante versus as estações meteorológicas identificadas nas etapas anteriores. Os atributos requeridos para os

modelos de culturas usados para avaliação do intervalo de *yield gap* são apresentados na Tabela 3, de acordo com o projeto GYGA.

Tabela 3: Características requeridas pelos modelos de simulação de culturas, de acordo com os protocolos do Projeto GYGA.

Características	Explicação
Simulação diária das etapas	Simulação diária do crescimento e desenvolvimento da cultura baseado em atributos do clima, do solo e fisiologia da cultura
Flexibilidade para simular práticas de manejo	As principais práticas de manejo incluem: data de semeadura, densidade da planta, maturidade da cultivar e irrigação
Simulação de processos fisiológicos fundamentais	Simulação de processos fisiológicos importantes, como desenvolvimento de culturas, assimilação líquida de carbono, partição de biomassa, relações de água das culturas e crescimento de grãos
Especificidade de culturas	Deve refletir os atributos fisiológicos específicos da cultura para respiração e fotossíntese, estágios críticos e períodos de crescimento que definem os períodos desenvolvimento vegetativo e de grãos, além da arquitetura do dossel
Requisitar o mínimo dos coeficientes "genéticos" de cultura	Requisitar o mínimo dos coeficientes "genéticos" das culturas, tais como índice máximo de área foliar, data de floração, etc.
Validação com dados observados em campo que se aproximam de YP e YW	Comparação do desempenho do modelo (produtividade de grãos, matéria seca acima do solo, evapotranspiração da cultura) com dados reais medidos de culturas de campo que receberam práticas de manejo conducentes a atingir YP (irrigado) ou YW (culturas de sequeiro)
“Amigo” do usuário	Modelos incorporados em interfaces amigáveis, com entradas e saídas de dados necessárias facilmente visualizadas e com flexibilidade para modificar valores padrão de parâmetros internos
Documentação completa da parametrização e disponibilidade do modelo	Modelos publicamente disponíveis, publicados na literatura, com documentação completa e com descrição de fontes de dados de onde os parâmetros internos foram derivados

Fonte: Adaptado de Global *Yield Gap* Atlas – GYGA

(<http://www.yieldgap.org/web/guest/methods-upscaling>)

O presente estudo, ao utilizar o modelo *CROPGRO Perennial Forage* da Plataforma DSSAT para a simulação de crescimento da *Brachiaria* e consequentemente estimar as produtividades Y_p e Y_w , considerou as características desejadas nos protocolos do projeto GYGA, uma que vez, como apresentado no item 2.2.3, o sistema DSSAT possui uma estrutura modular amigável e de fácil

manuseio do usuário, bem como o modelo *CROPGRO* considera os requisitos mínimos para simulação diária de crescimento da planta de acordo com as condições fisiológicas da planta, do clima, manejo e solo.

Os valores estimados de Y_p e Y_w são extrapolados a partir das estações meteorológicas para a escala da zona climática homogênea de modo a ponderar a proporção de área colhida ou plantada para cada combinação de estação meteorológica versus tipo de solo versus zona climática. Os resultados obtidos na escala de CZ são usados para extrapolar para o nível nacional, ponderando a proporção de área colhida para cada CZ. Neste estudo, os resultados alcançados para cada zona climática foram extrapolados para composição estadual de acordo com a proporção da área de pastagem cultivada para cada CZ.

Produtividade real das culturas: paralelamente às simulações de crescimento da *Brachiaria* no modelo *CROPGRO Perennial Forage* para estimativa das produtividades potencial e atingível, o último procedimento adotado neste estudo, conforme o projeto GYGA, foi a estimativa da produtividade real da pastagem no estado de São Paulo, detalhando no item 2.3.4. O projeto GYGA considera que as principais fontes de dados para estimativa da produtividade real estão em escala municipal, que são tão congruentes quanto possível com a distribuição da área de cultura dentro das zonas com o buffer das estações meteorológicas. Para culturas irrigadas, a média mais recente de 5 anos para produção agrícola real é preferida para evitar um valor atípico que possa ocorrer em um ano incomum, como efeitos de alguma alteração no sistema produtivo, como adoção de novas tecnologias (van ITTERSUM et al., 2013). Para as culturas de sequeiro, a média mais recente de 10 anos para os rendimentos agrícolas reais é preferida devido à maior variabilidade de um ano para outro. Considerando a realidade das pastagens brasileiras, onde muito pouco se adota a irrigação, com exceção de algumas áreas da pecuária leiteira, o presente estudo considerou na análise de eficiência produtiva a produção das pastagens de sequeiro.

2.3.2 Condições e dados de entrada para simulação da produtividade potencial e atingível

Para a simulação de crescimento da *Brachiaria brizantha* cv Marandu, o modelo *CROPGRO Perennial Forage* exige dados meteorológicos diários, informações de superfície e perfil do solo e manejo detalhado da cultura como entradas. A informação genética da cultura é definida em um arquivo de espécies de culturas do DSSAT, cujos dados devem ser fornecidos pelo usuário. As simulações são iniciadas no plantio ou antes do plantio, através da simulação de um período de pousio em solo nu. Essas simulações são realizadas diariamente e, em alguns casos, de hora em hora, dependendo do processo e do modelo de cultura. No final do dia, a planta e os balanços de água do solo, de nitrogênio e de carbono são atualizados, bem como o estágio de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura. Os principais parâmetros demandados pelos arquivos de espécie, cultivar e ecótipo pelo modelo *CROPGRO Perennial Forage* são apresentados na Tabela 4, conforme descrito por Pedreira (2009).

Tabela 4: Parâmetros utilizados nos arquivos de espécie, cultivar e ecótipo no modelo *CROPGRO Perennial Forage*

Sigla	Descrição
PAGE	Idade de transplântio
PLWT	Peso de matéria seca no plantio
MOW	Peso de parte aérea após a colheita
MVS	Número de folhas após a colheita
PLAI	Porcentagem diária de IAF destruído
TRIFL	Taxa de aparecimento de folhas
RDRMT	Sensibilidade relativa à dormência do cultivar ao comprimento do dia afetando partição
SLAVR	Área foliar específica do cultivar sob condições ideais de crescimento
FNPGL(4)	Efeito relativo da temperatura mínima noturna na taxa fotossintética do dia seguinte de folha simples saturada por luz
LFMAX	Taxa máxima de fotossíntese de folhas a 30 °C, 350 ppm CO ₂ , e alta luminosidade
SLWREF	Peso foliar específico no qual LFMAX é definido
CMOBMX	Máxima taxa de mobilização de carboidratos a partir de tecidos vegetativos
ALPHSR	Fração do novo tecido de reserva que possui carboidratos disponíveis
YLEAF VALUES	Descreve a partição de matéria seca somente entre tecidos vegetativos, em função do estágio vegetativo, para folha
YSTEM VALUES	Descreve a partição de matéria seca somente entre tecidos vegetativos, em função do estágio vegetativo, para colmo
YSTOR VALUES	Descreve a partição de matéria seca somente entre tecidos vegetativos, em função do estágio vegetativo, para tecidos de reserva
SLAREF	Área foliar específica do cultivar padrão no pico da fase vegetativa, sob condições ideais de temperatura, água e luz
SENDAY	Taxa máxima de abscisão foliar em resposta ao déficit hídrico
RTNO3,RTNH4	Consumo máximo de NO ₃ e NH ₄ por unidade de comprimento de raiz
TB, TO1, TO2, TM-1	Temp. base, primeira ótima, segunda ótima e máxima durante o desenvolvimento vegetativo
TB, TO1, TO2, TM-2	Temp. base, primeira ótima, segunda ótima e máxima durante a fase inicial do desenvolvimento reprodutivo
TB, TO1, TO2, TM-3	Temp. base, primeira ótima, segunda ótima e máxima durante a fase final do desenvolvimento reprodutivo
FNPTD(4)	Efeito do comprimento do dia na partição
FNPM(4)	Efeito do comprimento do dia na mobilização

Fonte: Pedreira (2009).

Para a simulação de crescimento da *Brachiaria* foi considerado um período de 30 anos para cada um dos quatro pontos selecionados, de acordo com a zona climática, com início em 1 de janeiro de 1986 e término em 30 de dezembro de 2015. Adotou-se no processo de plantio uma fertilização inicial

a lanço de 31 kg de Nitrogênio na forma de NH_4NO_3 por hectare e uma irrigação de 10 mm por aspersão, de modo a assegurar a germinação da semente. O primeiro pastejo, ou corte, foi feito dois meses após a data de semeadura, uma vez que a literatura aponta que normalmente as pastagens levam em torno de sessenta a noventa dias para se estabelecerem. Posteriormente os cortes foram repetidos a cada 28 dias, conforme Pequeno (2014). A colheita foi simulada considerando um corte mecânico da forrageira (dossel).

Foram conduzidos três tratamentos nas simulações de crescimento do capim considerando um período de 30 anos: (i) sequeiro e sem estresse de nutrientes para estimar a produtividade atingível (Y_w), aplicando-se o desligamento da limitação de nutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio etc.; (ii) irrigado e sem estresse de nutrientes, de modo a permitir a estimativa da produtividade potencial da pastagem (Y_p); e (iii) sequeiro e com adubação a lanço de $50\text{kg.ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$ de NH_4NO_3 , de modo a permitir a estimativa da produtividade próxima do real da pastagem (Y_r) para comparar com a proxy de produtividade estimada neste estudo. A quantidade de $50\text{kg.ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$ de Nitrogênio foi considerada no terceiro tratamento de modo a ser compatível com a realidade dos produtores que adotam a adubação e por ser, segundo experimentos da EMBRAPA Sudeste, a quantidade mínima que a planta necessita para continuar produzindo sem degradar. Os dados de perfil de solos utilizados, advindos do Projeto RADAMBRASIL, foram o Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico para os pontos de Catanduva, Presidente Prudente e Votuporanga e o Latossolo Vermelho Amarelo álico para São Carlos, sem necessidade de correção da fertilidade do solo.

Com a simulação foi quantificada a massa de forragem (quilogramas por hectare) em datas de colheita com a frequência de 28 dias, colhida mecanicamente em 10 centímetros (cm) acima do solo, e estimada a produção anual de forragem nos quatro pontos. Com isso, considerando os resultados do tratamento 1, ou seja, onde considera-se apenas a limitação hídrica para o crescimento do capim, foi possível a estimativa das produtividades atingíveis para cada um dos pontos, as quais foram utilizadas para a estimativa do *yield gap* explorável da eficiência produtiva. Para tanto, assumiu-se a produtividade atingível de cada localidade como sendo a média poderada de cada data de colheita (a cada 28 dias), calculada pela fração colhida em cada uma das datas ao longo de 30 anos.

Dados climáticos

Com base no estudo de van Wart (2013), o qual recomenda selecionar as regiões de significativa representatividade da pastagem, os dados meteorológicos utilizados para simulação com o modelo CROPGRO perenial forage foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Entre as variáveis climáticas consideradas estão temperatura máxima e mínima (em graus celsius – °C), precipitação (em milímetros) e radiação solar (em MJ.m²). As Figura 11, 12, 13 e 14 mostram o histórico e a distribuição dos dados climáticos para cada um dos pontos de simulação: Votuporanga, Catanduva, Presidente Prudente e São Carlos, respectivamente.

Figura 11. Histórico e distribuição diária dos dados de temperatura máxima em °C para Votuporanga, Catanduva, Presidente Prudente e São Carlos, respectivamente, para um período de 30 anos.

Figura 12. Histórico e distribuição diária dos dados de Temperatura mínima em °C para Votuporanga, Catanduva, Presidente Prudente e São Carlos, respectivamente, para um período de 30 anos.

Figura 13. Histórico e distribuição diária dos dados de Precipitação em mm para Votuporanga, Catanduva, Presidente Prudente e São Carlos, respectivamente para um período de 30 anos.

Figura 14. Histórico e distribuição diária dos dados de Radiação em MJ.m2 para Votuporanga, Catanduva, Presidente Prudente e São Carlos, respectivamente para um período de 30 anos.

Dados de perfil de solo

A organização da base de dados de solos contemplou a seleção dos solos predominantes em cada uma das quatro regiões de simulação. Isso foi possível através da utilização do mapa pedológico do Brasil publicado pela Embrapa Solos, construído com base no Projeto RADAMBRASIL (1973-1986), o qual contempla o levantamento do relevo do território brasileiro por imagens aéreas de radar. A base de dados de solos apresenta as seguintes características: nomenclatura, cor, textura e característica química.

Com o uso do programa ArcGis® 10.5 realizou-se um buffer de um raio de 100 quilômetros ao redor de cada ponto selecionado. Em seguida foi realizado o cruzamento desse buffer com o mapa

pedológico, de modo a quantificar e identificar os solos existentes ao redor de cada ponto para a seleção do mais representativo para a simulação.

Com a seleção dos solos mais representativos em cada região, assim como o realizado por SOARES (2015), utilizou-se o banco de dados com maior detalhamento do Projeto RADAMBRASIL com 5772 pontos contendo características físico-químicas de cada perfil de solo, entre os selecionados anteriormente. Entre as variáveis utilizadas para cada perfil estão densidade do solo, matéria orgânica do solo (MOS), capacidade de troca de cátions (CTC) e água disponível no solo. Enquanto que o tipo de solo foi obtido de Cooper et al (2005).

2.3.3 Modelo calibrado utilizado no estudo

O modelo CROPGRO – Perennial Forage adaptado para *Brachiaria brizantha* cv. Marandu foi calibrado por PEQUENO (2014), o qual resultou nos dados genéticos e no modelo concedido para utilização no presente estudo. O trabalho de Pequeno (2014) teve como ponto de partida o modelo CROPGRO - Perennial Forage desenvolvido para *Brachiaria brizantha* cv. Xaraes (PEDREIRA et al., 2011) sob a hipótese de que quando utilizados para diferentes cultivares de pastagem dentro da mesma espécie, o modelo calibrado anteriormente poderia simular com precisão o crescimento e a produção de forragem tanto sob condições irrigadas quanto de sequeiro, o que foi constatado pelo autor na simulação do capim marandu, a partir de alguns ajustes.

O estudo de Pequeno (2014) considera que o modelo CROPGRO pode ser adaptado usando parâmetros listados em arquivos de espécies, cultivares e ecótipos similares e para fornecer esses parâmetros, o autor utilizou valores relatados na literatura e comparou o crescimento simulado com os valores observados a partir do experimento conduzido por um período de dois anos na cidade de Piracicaba, estado de São Paulo.

Para a simulação, os dados experimentais utilizados por de Pequeno (2014), englobando solo, clima e manejo da forragem, foram descritos e inseridos em um arquivo experimental de "Manejo", denominado como "Arquivo X". Para melhor caracterizar as condições iniciais da pastagem foram ajustados a época de plantio e o peso da muda no transplante, considerando que o modelo de forragem pode ser executado usando o transplante em vez da semeadura, o que possibilita, segundo o autor, iniciar uma simulação com plantas já estabelecidas.

Como apresentado no item 2.2.3, no módulo solo-planta-atmosfera do DSSAT, a transpiração potencial é uma função do índice da área foliar e da evapotranspiração potencial e o modelo CROPGRO perenial forage calcula a evapotranspiração potencial (ET) usando um dos dois métodos: o método padrão de Priestley e Taylor (1972) que requer apenas a radiação e temperatura solar diária, descrita em detalhes por Richie (1972); e o método Penman-Montieth FAO 56 (ALLEN et al., 1998), que utiliza dados de velocidade do vento e temperatura (do ponto de condensação) no arquivo de clima para calcular

ET potencial (JONES et al., 2003). Pequeno (2014) verificou que sob condições de sequeiro, as simulações usando o método Penman-Monteith FAO 56 deram respostas de estresse hídrico mais realistas do que o método de Priestley e Taylor.

Para a avaliação estatística da performance do modelo, PEQUENO (2014) considerou uma comparação entre valores observados em campo com os simulados para o acúmulo de biomassa, o índice de área foliar (LAI), o peso da folha, o peso do caule, a área foliar específica, a fotossíntese foliar e a concentração de nitrogênio, de modo a utilizar o modelo com dados reais de solo e clima. Muitos desses parâmetros foram otimizados usando o método de incerteza de probabilidade generalizada, o GLUE.

Os principais passos do procedimento GLUE no DSSAT são baseados em Beven e Binley (1992) e seguiram este procedimento: 1) Desenvolver distribuições de parâmetros anteriores; 2) Gerar conjuntos de parâmetros aleatórios a partir das distribuições de parâmetros anteriores; 3) Executar o modelo com os conjuntos de parâmetros gerados aleatoriamente; 4) Calcular os valores de probabilidade; e 5) Construir distribuição e estatística posterior (JONES et al., 2011). Este procedimento gerou aleatoriamente valores de parâmetros específicos de cultivar, dentro de um intervalo esperado ou “atribuído” com base nos valores mínimos e máximos de todos os cultivares previamente calibrados para uma determinada safra.

Para avaliar o desempenho do modelo, Pequeno (2014) utilizou a relação observada/simulada, erro quadrático médio (RMSE) e índice de concordância de Willmott (D-Stat) (WILLMOTT, 1981; WILLMOTT et al., 1985).

Foram modificados pelo autor os parâmetros de particionamento do modelo de *B. brizantha* para fornecer mais haste e armazenamento por longos períodos de rebrota, além de melhorias nos parâmetros relativos à temperatura, fotoperíodo e radiação solar nos processos de fotossíntese, particionamento e mobilização, com o objetivo de aumentar o ciclo de particionamento e mobilização durante o novo crescimento. Além disso, o autor realizou uma parametrização para a simulação da concentração de nitrogênio com dados reais, apesar de apontar que ainda há necessidade de melhorias no código do modelo *CROPGRO Perennial Forage* para obter maior precisão quanto a esse parâmetro.

2.3.4 Descrição dos dados de produtividade real

Para o cálculo da eficiência produtiva e do *yield gap* explorável das pastagens no estado de São Paulo é necessário que além da produtividade atingível, estimada a partir do modelo biofísico de crescimento da *Brachiaria brizantha*, seja identificado uma proxy de produtividade real das pastagens em termos de formação de forragem.

Para isso, o presente estudo utilizou a composição do rebanho bovino categorizado pelo Censo Agropecuário (IBGE, 2006), em porcentagem, aplicando-a ao número de cabeças de gado bovino

encontrada no banco de dados da Produção Pecuária Municipal (PPM) levantados pelo IBGE² para o período de 2007 a 2016, ou seja, 10 anos, como recomenda o projeto GYGA para produção em sequeiro.

Com essa categorização do Censo foi possível transformar cabeças animais em unidade animal (UA), conforme Arantes et al. (2018), e os dados da pecuária das propriedades com mais de 50 cabeças foram classificados em três grupos de idade, a saber: menor do que 1 ano (bezerros e bezerras); de 1 a 2 anos (novilhos e novilhas); e maior que 2 anos (vacas, touros, bois/garrotes para corte e bois/garrotes para trabalho). Assim, assumiu-se que a composição do rebanho bovino permaneceu praticamente a mesma de 2006 até 2016, devido à indisponibilidade de um novo Censo.

Para os municípios onde foram identificadas área de pastagem pelo Lapig, conforme descrito no item 2.3.2, foi realizada uma combinação da unidade animal por hectare para estimar a atual taxa de lotação (UA.ha⁻¹). Considerando que não há um mapeamento das áreas de pasto pelo Lapig por todo o período de análise, de 2007 a 2016, que permitisse uma estimativa de taxa de lotação mais precisa para entre os anos, adotou-se como valor inicial o total de áreas de pastagem levantadas Censo Agropecuário de 2006, única base oficial para o período. Segundo o levantamento censitário, em 2006 as áreas de pastagem no estado de São Paulo somavam 6.891.575, ou seja, observa-se um decréscimo de 11, 17% das áreas de pastagens contabilizadas pelo Lapig em 2016 em relação ao censo. Para o estado de São Paulo a composição da área de pasto entre os anos de 2007 a 2016, portanto, considerou uma taxa de decréscimo constante de 1, 11% das áreas.

Com base no que a literatura aponta para a raça de gado bonivo nelore, a qual compõe de 85% a 90% da pecuária brasileira (MOUSQUER et al., 2014 *apud* ARANTES et al., 2018), para cada categoria, o peso total (baseado em valores médios dessa raça) foi convertido em unidades animais equivalentes (UA) de 450 kg, que foi, posteriormente, dividido pela área de pastagem de cada um dos municípios selecionados, de modo a compor as respectivas taxas de lotação (UA.ha⁻¹).

Para a estimativa da eficiência da pastagem foi necessário utilizar um fator de conversão de unidade animal para quantidade (em kg) de forragem por hectare, de modo a ser análogo à produtividade atingível, em termos de unidade.

Considerando que no Brasil a maior parte da alimentação do gado bovino é proveniente de pasto (STRASSBURG et al, 2014), o presente estudo assumiu, em uma abordagem conservadora, que os pastos são a principal fonte nutricional do gado, assumindo-se que 80% das unidades animais nas regiões de análise estão sob sistema de pastagem. Com isso, foi estimado uma demanda diária por alimentos (DDA) da pecuária bovina em função da taxa de lotação (TE, em UA.ha⁻¹), conforme a seguinte equação:

$$DDA = (TE * I)/E$$

em que I é o consumo diário de alimento por cada unidade animal, uma constante adotada como I=8 kg por unidade animal de acordo com o estudo de Strassburg et al. (2014) e em uma segunda

² <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal>

análise com $I=11,25$ kg conforme Arantes et.al. (2018), ou seja, 2,5% do peso de uma unidade animal; e E representa a eficiência do pastoreiro, definido como 50%, segundo Barioni et al. (2005), uma eficiência realista para os sistemas de pastagem no Brasil.

A demanda diária por alimento convertida em valores anuais, expressa em quilogramas de forragem por hectare, foi estimada para os quatro municípios do estado de São Paulo onde se localizam as estações meteorológicas consideradas para a simulação da produtividade atingível, ou seja, Votuporanga, Presidente Prudente, São Carlos e Catanduva. Esta estimativa foi utilizada como proxy da produtividade real dos pastos em cada um desses pontos. Para a estimativa de produtividade real do estado de São Paulo considerou-se uma média ponderada entre as produtividades de cada um dos 4 pontos no estado, também considerado nas simulações, conforme a representatividade de áreas de pastagem nas suas respectivas zonas climáticas homogêneas.

Além da proxy de produtividade real, feita através da utilização dos dados do Censo Agropecuário 2006 e da PPM, o terceiro tratamento simulado³ no *CROPGRO Perennial Forage* foi considerado como um meio de comparação a tais resultados.

2.3.5 Estimativa da eficiência produtiva e *yield gap* explorável

A partir dos resultados de produtividade real e da produtividade atingível das pastagens no estado de São Paulo foi possível estimar a eficiência produtiva dessa cultura no estado e o *yield gap* explorável.

A eficiência da produção dos pastos foi estimada pela razão entre a produtividade real e a produtividade atingível. Optou-se pela utilização da produtividade atingível, ao invés da produtividade potencial, como exposto anteriormente, devido à realidade de produção de pastagens no Brasil e também do estado de São Paulo, onde observa-se um uso irrisório de irrigação nestas áreas, especialmente por produtores de pecuária de corte, responsáveis pela maior parcela de uso área de pastagens.

O *yield gap* explorável (Yg) foi calculado pela diferença entre a produtividade atingível e a produtividade real, assumindo-se um limite máximo de produtividade igual a 80% da produtividade atingível, assim como em Marin (2014).

---

³ Pastagem em sequeiro e com adubação a lanço de $50\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ de NH_4NO_3 , de modo a permitir a estimativa da produtividade próxima do real da pastagem (Yr).

2.4 Resultados e Discussões

2.4.1 Desempenho do CROPGRO Perennial Forage

Simulações da Produtividade atingível e Produtividade Potencial

As Figura 16, 17, 18 e 19 apresentam o histórico das simulações em sequeiro (ou seja, produtividade atingível, tendo apenas o fator hídrico como limitante), mostrando a quantidade de forragem acumulada para cada 28 dias de corte, o índice de área foliar (LAI) e o peso foliar em 30 anos, e também mostram os históricos para as simulações irrigadas, ou seja, de produtividade potencial, sem limitação hídrica ou de nutrientes para cada um dos pontos de simulação.

Os resultados para a produtividade atingível apontam para Votuporanga uma média acumulada, em termos de biomassa úmida, de $17.202 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ de forragem, Catanduva com $17.230 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, Presidente Prudente com $17.605 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e São Carlos com $17.509 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Já os resultados para produção irrigada revelam que Votuporanga apresenta um potencial de produtividade de $21.000 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ de forragem, Catanduva de $21.245 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, Presidente Prudente de $21.830 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e São Carlos de $21.613 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Em relação à produtividade potencial, é importante destacar que o modelo calibrado por Pequeno (2014) utilizou um máximo de $400 \text{ kg de N.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, logo, é possível que o modelo não consiga estimar valores potenciais significativamente superiores aos apresentados para as regiões simuladas no caso dos sistemas de produção utilizaram valores de N superiores a esse patamar, o que não é comumente observado.

Nota-se, portanto, que há pouca variabilidade, tanto na produtividade atingível quanto para a potencial, entre as quatro regiões consideradas para simulação no estado de São Paulo, conforme Figura 15. Tal fato pode ser explicado pela pouca variabilidade climática entre os pontos simulados, em especial sobre os dados de temperatura e precipitação, conforme apresentam as Figuras 11, 12 e 13 item 2.3.3. A pouca variação dos dados climáticos entre os quatro pontos, em parte, pode estar relacionada à altitude, pois as estações encontram-se em posições bastante próximas em relação a essa variável, principalmente Votuporanga, Catanduva e Presidente Prudente.

Figura 15. Média mensal de Produtividade Atingível e Produtividade Potencial para as regiões de simulação em um período de 30 anos.

Entre as variáveis ambientais que possuem maior impacto sobre as variações de crescimento e desenvolvimento das forrageiras estão a radiação solar, precipitação e temperatura do ar (CRUZ, 2010), especialmente em relação aos processos de senescência dos tecidos vegetais, onde há uma alteração da taxa de desenvolvimento de folhas, perfilhamento, florescimento, alongamento foliar e por fim do manejo da gramínea (NABINGER; PONTES, 2001 *apud* CRUZ, 2010). Com isso, com a ocorrência de pouca variabilidade entre os dados climáticos pode-se explicar a similaridade entre os pontos simulados.

O maior acúmulo de forragem ocorreu nas épocas de primavera e início do verão e, como mostram as séries históricas climáticas, coincidiu com períodos onde há maior temperatura média e índices pluviométricos mais elevados, o que leva a uma maior taxa de evapotranspiração. Esse resultado pode ser observado tanto no cultivo em sequeiro quanto no irrigado, entretanto, é mais acentuado para a produção em sequeiro, uma vez que nesse sistema a precipitação é um dos principais fatores responsáveis pela maior ou menor limitação hídrica para as forrageiras.

Por outro lado, no outono, e principalmente no inverno (especialmente nos meses de junho a setembro), com um período menor, baixa umidade relativa do ar e menores temperaturas noturnas, foi observada uma maior limitação de crescimento das pastagens nos quatro pontos de simulação, sendo mais acentuada nas simulações de produtividade atingível para as regiões de Catanduva e Presidente Prudente. De acordo com Valle (2001) isso ocorre comumente nas regiões tropicais de produção de gramíneas, gerando um padrão estacional de produção que pode ser acentuado ou não conforme o genótipo utilizado.

Nota-se também que o modelo realiza uma boa simulação em longo prazo para o índice de área foliar (LAI) para os quatro pontos, se comparado aos valores apresentados pela literatura (Pequeno, 2014; Cruz, 2010). De acordo com CRUZ (2010), o LAI é diretamente relacionado aos processos de

assimilação de carbono e interceptação luminosa pelas plantas, e, portanto, é considerado a principal variável estrutural do pasto.

Em termos de produção de matéria seca, descontando 20% do valor produzido de biomassa, as simulações de produtividade potencial indicam que a região de Presidente Prudente possui um potencial médio de $17.465 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, a região de Votuporanga $16.800 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, Catanduva $16.996 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, e São Carlos $17.290 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

De acordo com SANTOS (2014), em solos de textura média e de textura argilosa o acúmulo de matéria seca para capim marandu varia entre 15 mil a 25 mil $\text{kg MS.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ no estado de São Paulo, sendo que as regiões de Votuporanga e Presidente Prudente inserem-se em uma faixa de produção de 20 a 25 mil, enquanto São Carlos e Catanduva na faixa de 15 a 20 mil $\text{kg MS.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Tais resultados, apesar de estimados a partir de modelos matemáticos construídos com base nos valores de graus-dias (soma térmica) e disponibilidade de água no solo, indicam uma certa similaridade com a estimativa alcançada pelo modelo *CROPGRO Perennial Forage* calibrado por Pequeno (2014).

Produtividade Atngivel

Histrico - LAI

Histrico - Peso da folha

Produtividade Potencial

Histrico - LAI

Histrico - Peso da folha

Figura 16. Histrico dos valores dirios simulados para o acmulo de forragem (kg.ha⁻¹), ndice de rea foliar (LAI) e peso da folha para a *Brachiaria brizantha* colhida a cada 28 dias durante o perodo de 1986 a 2016 para a esto meteorolgica de Votuporanga e respectiva zona climtica homognea.

Figura 17. Histórico dos valores diários simulados para o acúmulo de forragem (kg.ha⁻¹), índice de área foliar (LAI) e peso da folha para a *Brachiaria brizantha* colhida a cada 28 dias durante o período de 1986 a 2016 para a estação meteorológica de Catanduva e respectiva zona climática homogênea.

Figura 18. Histrico dos valores dirios simulados para o acmulo de forragem ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), ndice de rea foliar (LAI) e peso da folha para a *Brachiaria brizantha* colhida a cada 28 dias durante o perodo de 1986 a 2016 para a esto meteorolgica de Presidente Prudente e respectiva zona climtica homognea.

Figura 19. Histórico dos valores diários simulados para o acúmulo de forragem (kg.ha⁻¹), índice de área foliar (LAI) e peso da folha para a *Brachiaria brizantha* colhida a cada 28 dias durante o período de 1986a 2016 para a estação meteorológica de São Carlos e respectiva zona climática homogênea.

2.4.2 Eficiência da produção de pastagem no estado de São Paulo

A taxa de lotação bovina foi estimada com base nos dados de produção pecuária municipal (PPM) levantados pelo IBGE para o período de 2007 a 2016, através da conversão de categoria animal em unidade animal. Para o estado de São Paulo, as estimativas apontam uma taxa média de lotação de 1,33 UA.ha⁻¹ para o período, variando de 1,36 UA.ha⁻¹ em 2007, para 1,33 UA.ha⁻¹ em 2011 e 1,42 UA.ha⁻¹ em 2016. Uma distribuição espacial para esses três anos é apresentada pela Figura 20, os mapas para os demais anos estão no APÊNDICE B. Segundo estas estimativas, houve no período um acréscimo de 4,2% na taxa de lotação animal no estado. O valor médio encontrado para o estado de São Paulo se assemelha ao valor de 1,34 UA.ha⁻¹ mensurado por Arantes et al. (2018).

Considerando apenas as quatro regiões de simulação, observou-se uma taxa de lotação média de 1,67 UA.ha⁻¹, sendo que a região de Presidente Prudente apresentou uma taxa média de 1,85 UA.ha⁻¹, Votuporanga 1,83 UA.ha⁻¹, Catanduva 1,63 UA.ha⁻¹ e São Carlos 1,83 UA.ha⁻¹.

Apesar de apresentar uma taxa de lotação inferior ao que potencialmente poderia alcançar, o estado de São Paulo ainda possui valores mais elevados de lotação se comparados à média brasileira ao longo do tempo (STRASSBURG et al., 2014; ARANTES et al., 2018). Essa tendência deve-se a uma maior tecnificação de produtores e especialmente, pelo fato do estado sofrer uma redução de área de pastos, conforme observação dos dados do Censo Agropecuario de 2006 e Lapig (2016).

A produtividade real, apresentada na Tabela 5, foi construída com base na taxa de lotação animal (UA.ha⁻¹), através da estimativa da quantidade diária demandada por forragem pelos animais por hectare e posterior conversão em demanda anual – a proxy da produtividade real em termos de produção de pastagem. Para a estimativa da produtividade real foram realizadas duas metodologias: uma considerando o valor diário de consumo animal (8 kg.UA⁻¹.dia⁻¹) de acordo com STRASSBURG et al. (2014) e a segunda de acordo com ARANTES et al. (2018) (11,25 kg.UA⁻¹.dia⁻¹).

Os resultados da proxy de produtividade com base em ARANTES et al. (2018) apresentaram-se consideravelmente superiores aos alcançados pela metodologia utilizada por STRASSBURG et al. (2014). Com o intuito de respaldar os valores de produtividade real, estimados através de dados censitários e de levantamentos municipais e para optar por uma ou outra metodologia, a Figura 21 apresenta os resultados das simulações relacionados ao tratamento de número três no modelo *CROPGRO Perennial Forage*.

Figura 20. Distribuição espacial da taxa de lotação (UA/ha) das pastagens no estado de São Paulo com base nos dados de rebanho bovino entre 2007 a 2016, gerados a partir do Levantamento Municipal da Pecuária (PPM – IBGE).

Figura 21. Produção de forragem simulada do tratamento 3: cultivo em sequeiro e com adução anual de 50 kg.ha⁻¹.ano⁻¹ por um período de 30 anos.

Observa-se que, de modo geral os valores da proxy de produtividade, tanto pelo método de STRASSBURG (2014) quando de ARANTES (2018), revelaram-se inferiores aos valores simulados no modelo de forragem. Entretanto, as diferenças entre as produtividades reais alcançadas por STRASSBURG (2014) foram menores e mais próximas dos valores simulados.

Entende-se que tais diferenças podem ser provenientes das limitações encontradas nos dados censitários, cujos levantamentos podem apresentar estimativas com outliers. Outra hipótese seria a necessidade de melhoria do modelo para condições mais reais de produção em determinadas regiões. Apesar disso, no geral, como observa-se na literatura, é aceitável uma diferença de até 3 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ de forragem entre resultados observados no campo e os simulados por modelos, ou seja, os resultados encontrados para a proxy de produtividade estão dentro de um patamar aceitável.

Além disso, é importante se considerar que ao comparar resultados de produção de pastagem provenientes de modelos de simulação, os quais geralmente trabalham com condições de corte mecânico, com condições reais de produção utilizando o pastejo, há uma significativa diferença em acúmulo total de forragem, pois no pastejo há uma tendência ocorrência de valores superiores de produção. Isso deve-se ao fato de que sistemas forrageiros em pastejo nota-se uma maior reciclagem de nutrientes, maior dispersão desses nutrientes na pastagem com a presença das fezes animais e ainda o pisoteio animal permite maior contato do solo com a parte em senescência da forrageira, o que acelera o processo de decomposição, entre outros fatores.

Para o estado de São Paulo ao considerar as quatro regiões selecionadas neste estudo e ao ponderar a representatividade espacial de cada uma, observa-se que a produtividade média real, com base na proxy estimada, é de 8 Mg de forragem.ha⁻¹.ano⁻¹. Esse resultado adotou como valor para a constante I (consumo diário de alimento por cada unidade animal) para estimação da demanda diária por forragem, conforme adotada por Strassburg et al. (2014).

A média ponderada da produtividade atingível, bem como da produtividade potencial também é apresentada na Tabela 5 para as quatro regiões selecionadas e para o estado de São Paulo, de acordo com as zonas climáticas homogêneas e estações meteorológicas obtidos a partir das simulações no modelo *CROPGRO Perennial Forage* da Plataforma DSSAT.

Tabela 5. Produtividade real, atingível e potencial, eficiência de produção e *yield gap* explorável da pastagem nas quatro regiões selecionadas e valores ponderados para o estado (em Mg. ha⁻¹.ano⁻¹).

	Votuporanga	Presidente Prudente	Catanduva	São Carlos	Média Pond. São Paulo
Produção Real (Mg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	ST ⁴ 8,5	8,6	7,6	6,1	8,0
	AR ⁵ 12,0	12,1	10,7	8,6	11,3
	CPF ⁶ 5,2	5,5	5,3	5,7	5,4
Produção Atingível (Mg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	17,2	17,6	17,2	17,8	17,4
Produção Potencial (Mg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	21,0	21,8	21,2	21,6	21,3
Eficiência da Produção	49,7%	49,7%	44,2%	35,1%	46,4
<i>Yield-Gap</i> Explorável (Mg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	5,2	5,4	6,1	7,9	5,8

De acordo com as simulações, é possível alcançar uma produtividade de aproximadamente 17,4 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ de forragem, no caso de *Brachiaria brizantha* cv Marandu, sem limitação de qualquer nutriente para o crescimento e desenvolvimento da planta e considerando apenas restrições baseadas no estresse hídrico (produtividade atingível). Apesar da carência de estudos que tenham realizado uma análise de produtividade baseada neste tipo de modelagem para as áreas de pastagem no Brasil, o que, portanto, não possibilita uma discussão e ajustes acerca dos valores obtidos, o resultado é explícito em revelar que há possibilidade de melhorias e incrementos de produtividade das áreas de pasto no estado de São Paulo.

Ressalta-se que, de acordo com a realidade de produção das pastagens, seja no Brasil ou estado de São Paulo, é mais coerente gerar estimativas amparadas por produtividade atingível (em condições de sequeiro) ao invés de produtividade potencial, uma vez que não é adotado, e nem mesmo é viável, o emprego de sistemas irrigados para produção de pastos da sua vasta área ocupada, com algumas exceções de áreas menores destinadas a pecuária leiteira.

A eficiência da produção das pastagens variou entre 35,1% em São Carlos e 49,7% em Votuporanga e Presidente Prudente, como apresenta a Tabela 5 e Figura 22. Considerando uma média ponderada entre os pontos de simulação, de acordo com a fração de área representada em cada zona climática homogênea, o estado de São Paulo apresenta uma eficiência de 46,4%, ou seja, uma significativa lacuna de produtividade, o que mostra a oportunidade de melhorias de rendimentos.

⁴ O valor de consumo diário de forragem por animal/dia igual a 8kg, conforme STRASSBURG et al. (2014).

⁵ O valor de consumo diário de forragem por animal/dia igual a 11,25kg, conforme ARANTES et al. (2018).

⁶ Valores simulados no modelo *CROPGRO Perennial Forage*

Figura 22: Distribuição dos valores de eficiência produtiva entre as quatro regiões de simulação no estado de São Paulo: Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e Votuporanga

Os resultados de eficiência produtiva indicam, portanto, que há um significativo espaço para incremento de produtividade das pastagens paulistas, apesar das limitações quanto aos dados de produtividade real gerados a partir de uma extrapolação um tanto conservadora, e ainda que estimativas de produtividade atingível (cultivo em sequeiro) estejam mais passíveis a erros do que simulações de produtividade potencial (cultivos irrigados), de acordo com Marin (2014).

Em uma comparação com estudos anteriores de estimativas de produtividade potencial das pastagens observa-se que os resultados de eficiência obtidos no presente estudo foram relativamente maiores do que os dos modelos de estimativas utilizados por outros autores (STRASSBURG et al., 2014; ARANTES et al., 2018), que são basicamente empíricos, portanto com um menor nível de complexidade se comparado aos modelos mecanísticos (biofísicos), como o aqui utilizado. Os sistemas extensivos, adotados na maioria das áreas de pecuária do estado de São Paulo, bem como do Brasil, caracterizam-se pela utilização de pastagens como principal fonte de alimentos do rebanho, e nesses sistemas o padrão de desempenho na produção de pastagem é variável, a depender da interação de fatores como características de solo, condições climáticas, sanidade animal, genótipo e manejo do gado (EMBRAPA, 2015). Por esse motivo, o uso de modelos mecanísticos é interessante, ao permitir considerar explicitamente as diversas variáveis que influenciam a produtividade, ao contrário da maioria dos modelos empíricos.

Os resultados quanto ao *yield gap* explorável (Tabela 5 e Figura 22) foram obtidos a partir da diferença entre a produtividade atingível das pastagens e a produtividade real observadas nas áreas de pastos do estado de São Paulo. Do valor atingível foi descontado 20% com o intuito de representar um

próposito um tanto mais realista para as pastagens no estado, assim como colocado nos protocolos do Projeto GYGA e adotado em Marin (2014). Com isso, observa-se que há uma lacuna de produtividade de $5,8 \text{ Mg. ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ de forragem no estado de São Paulo, o que oportuniza um processo de intensificação que permita alcançar uma eficiência de 80% nas suas áreas de pasto. Além disso, considerando as quatro regiões de simulação, como mostra a Figura 23, a região de São Carlos é a que possui maior potencial de incremento de produtividade, portanto, de intensificação, com cerca de $7,9 (\text{kg}.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1})$ de Yg; seguida da região de Catanduva com um Yg médio de $6,1 (\text{kg}.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1})$. Por outro lado, as regiões de Votuporanga e Presidente Prudente apresentam os menores potenciais de intensificação com base em um Yg médio de 5, 2 e $5,4 (\text{kg}.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1})$ para incrementar de produtividade e aumentar a produção de forragem.

Figura 23: Distribuição dos valores de *yield gap* explorável (em $\text{kg}.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$) entre as quatro regiões de simulação no estado de São Paulo: Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e Votuporanga

Neste sentido, considerando os valores de *yield gap* explorável, o estado de São Paulo em um cenário de ganhos de eficiência em $5,8 \text{ Mg. ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ possibilitaria um incremento em 58% em sua atual taxa de lotação animal, passando de $1,33 \text{ UA}.\text{ha}^{-1}$ para $2,29 \text{ UA}.\text{ha}^{-1}$, considerando uma relação simples entre as variáveis.

Tal cenário apresenta perspectivas para um caminho de intensificação mais sustentável da pecuária no estado, e possivelmente no Brasil, uma vez que a priorização de áreas de maior *yield gap* para intensificação pode contribuir para a redução da pressão por abertura de novas áreas de pastagem em locais com baixo potencial produtivo, áreas estas que podem ser ocupadas para produção agrícola ou para regularização ambiental.

Nesse sentido, a análise de eficiência produtiva e de *yield gap* pode ser um instrumento de grande valia para a maior assertividade nas políticas públicas voltadas ao setor pecuário.

A transição para uma pecuária mais eficiente demanda por investimentos tanto financeiros, via acesso a crédito rural, quanto por programas de assistência técnica e extensão rural (ATER), especialmente pelo setor público, os quais possibilitariam acesso a tecnologias mais sustentáveis e melhores sistemas de manejo, permitindo ao produtor encontrar caminhos mais eficientes para o uso de recursos (água, agroquímicos, etc.). Esses e outros aspectos são importantes, uma vez que a capacidade de assimilação e adaptação dos produtores a mudanças dentro de sistemas de produção são componentes-chave do sucesso do ponto de vista produtivo e ambiental. O Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura - Plano ABC, discutido em mais detalhe no Capítulo III, aborda os aspectos de transição de áreas de pastagens para tecnologias mais sustentáveis. Diversos programas previstos no Plano ABC envolvem o setor pecuário, sendo eles: recuperação de pastagens degradadas (RPD); e sistemas de integração Lavoura Pecuária e Floresta (iLPF) e fixação biológica de nitrogênio (FBN).

Por fim, os resultados das simulações sugerem que o modelo *CROPGRO Perennial Forage* integra bem os processos fisiológicos *B. brizantha*, sendo possível recomendar sua utilização para simular crescimento de longo prazo (30 anos) desta gramínea com certa acurácia. Apesar disso, é prudente que tais resultados sejam validados a partir de experimentos, permitindo assim a incorporação de modificações ao DSSAT, especialmente se o intuito for a extrapolação para uma escala mais abrangente, como um bioma ou até mesmo para todo o território nacional. Desse modo, a modelagem de culturas se mostra como uma ferramenta útil para pesquisadores, que simular experimentos antes de conduzi-los no campo, como para gestores de políticas públicas voltadas ao setor pecuário e ao desenvolvimento rural sustentável.

2.4.3 Incertezas e limitações

O uso de modelagem mecanística, apesar de sua robustez e reconhecimento na literatura científica como de utilidade para as mais diversas finalidades, apresenta um conjunto de incertezas associado. Como apresenta Marin (2014), a comunidade de modeladores do clima, especialmente, preocupa-se com a questão do uso de uma abordagem determinística, sem contar com uma análise probabilística adequada para tais incertezas. Uma solução para minimizar as incertezas associadas aos modelos mecanísticos de culturas é o uso de multimodelos. Neste sentido, para estudos de maior abrangência, como Brasil, além das considerações acerca das calibrações e parametrizações necessárias ao modelo *CROPGRO Perennial Forage*, é aconselhável que se faça uso de mais de um modelo, a exemplo do APSIM.

Apesar das incertezas associadas às simulações, o modelo *CROPGRO Perennial Forage* apresentou boa desenvoltura nas simulações de longo prazo, se comparado com os dados e estimativas

apontados pela literatura. Assim, é provável que com poucos estudos experimentais para as regiões de extrapolação já seja possível sua validação. Além disso, uma maior acurácia e precisão neste modelo podem ser alcançados através de calibrações de estresse hídrico e de nitrogênio, além de usos de solos mais pobres para experimentos.

A proposta do Projeto GYGA em considerar solos predominantes para uma região de simulação, delimitada pelo buffer ao redor das estações meteorológicas, apresenta uma certa facilidade na composição de bancos de dados e na minimização do número de simulações, entretanto é importante considerar que, como também observa Marin (2014), a representação dos solos pelos modelos inseridos no DSSAT ainda apresenta grande simplificação, sendo mais uma fonte de incertezas.

Uma das maiores limitações na estimativa do *yield gap* é a definição de uma produtividade real das pastagens, em termos de formação de forragem. O método utilizado neste estudo é um tanto “grosseiro”, uma vez que há incertezas associadas aos dados provenientes de Censos ou levantamentos agropecuários, podendo resultar em subestimativa ou superestimativa de valores.

Por fim, para melhorar a qualidade dos resultados obtidos em simulações através de modelos mecanísticos, é necessário um melhor conhecimento de aspectos morfofisiológicos das plantas forrageiras e, para isso, é importante a compreensão dos efeitos da ação do animal na rebrota das plantas e, por consequência, na sua produção (PEDREIRA, 2009). Contrastar os dados coletados em sistemas de pastejo com aqueles de corte mecânico da forragem permitir gerar melhores condições de calibração para os modelos e minimizar as inconsistências quanto às simulações de produtividade real, por exemplo, além de possibilitar uma boa predição do modelo quanto às produtividades potenciais e atingíveis.

2.5 Considerações finais

O modelo *CROPGRO Perennial Forage* mostrou-se capaz de simular satisfatoriamente, em longo prazo, o crescimento e desenvolvimento das pastagens para os quatro agrupamentos de dados que compõem as regiões de simulação: Votuporanga, Catanduva, Presidente Prudente e São Carlos. Apesar das incertezas associadas às variáveis climáticas e de solo e aos parâmetros genéticos da planta, os valores obtidos para as produtividades real, atingível e potencial apresentaram certa similaridade àqueles encontrados em literatura.

A eficiência média atual da produção de pastagens e o *yield gap* médio explorável encontrados via simulação no estado de São Paulo foram de 46,4% e 5,8 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente. Estes resultados indicam que há um significativo espaço para incremento de produtividade das pastagens neste estado.

A priorização de áreas de maior *yield gap* para intensificação pode contribuir para a redução da pressão por abertura de novas áreas de pastagem em locais com baixo potencial produtivo, áreas estas

que podem ser ocupadas para produção agrícola ou para a regularização ambiental, evitando a expansão do desmatamento.

O presente estudo mostrou que modelos mecanísticos como o *CROPGRO Perennial Forage* podem ser instrumentos de grande utilidade na avaliação e no direcionamento de políticas públicas condizentes com a construção de diretrizes para o desenvolvimento rural sustentável. Sendo um ponto de partida para futuros estudos em escala nacional, este tipo de análise também pode contribuir para o aumento de eficiência do setor pecuário, além fornecer dados de entrada para modelos econômicos de projeções quanto à demanda e dinamismo dos preços no mercado.

Referências

- ABIEC, A. B. das I. E. de C. **Relatório anual: Perfil da Pecuária no Brasil**. 2017. Disponível em: <<http://abiec.siteoficial.ws/images/upload/sumario->>.
- ALMEIDA, M. H. S. P. de. **Análise econômico-ambiental da intensificação da pecuária de corte no Centro-Oeste brasileiro**. 2010. 2010.
- ANDRADE, A. S.; SANTOS, P. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; DE ARAUJO, L. C.; PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S.; MARIN, F. R.; LARA, M. A. S. Simulating tropical forage growth and biomass accumulation: An overview of model development and application. **Grass and Forage Science**, v. 71, n. 1, p. 54–65, 2016.
- ARANTES, A. E.; COUTO, V. R. de M.; SANO, E. E.; FERREIRA, L. G. Potential of livestock intensification in Brazil based on agricultural census and satellite data analysis. n. 1, 2018.
- BARIONI, L. G.; MARTHA JÚNIO, G. B.; RAMOS, A. K. B.; VELOSO, R. F.; RODRIGUES, D. C.; VILELA, L. Planejamento e gestão do uso de forrageiras na produção de bovinos em pastejo. In: 20º Simpósio sobre Manejo da Pastagem, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2003.
- BARRETTO, A. G. O. P.; BERNDES, G.; SPAROVEK, G.; WIRSENIUS, S. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: An analysis of the 1975-2006 period. **Global Change Biology**, v. 19, n. 6, p. 1804–1815, 2013.
- BOOTE, K.J., JONES, J.W., HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: Peart, R.M., Curry, R.B. (Eds.), *Agricultural Systems Modeling and Simulation* (Chapter 18). Marcel Dekker, Inc, New York, pp. 651/692, 1998.
- CARRER, M. J.; SOUZA FILHO, H. M.; VINHOLIS, M. D. M. B. **Determinantes da demanda de crédito rural por pecuaristas de corte no estado de São Paulo**. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 51, n. 3, p. 455–478, 2013. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84890181681&partnerID=40&md5=29720c6dd85da66d62369eb58b26e338>>.

CRUZ, P. G. da. **Produção de forragem em *Brachiaria brizantha*: adaptação, geração e avaliação de modelos empíricos e mecanicistas para estimativa do acúmulo de forragem**. 2010. 36 2010.

Disponível em:

<<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/16613%5Chttp://www.bibliotekevirtual.org/index.php/2013-02-07-03-02-35/2013-02-07-03-03-11/1011-sap/v13suplemento/9354-caracteristicas-morfogenicas-de-brachiaria-ruziziensis-em-sistemas-de-c>>.

DIAS-FILHO. **Os desafios da produção animal em pastagens na fronteira agrícola brasileira**.

2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Moacyr_Dias-Filho/publication/261025809_Os_desafios_da_producao_animal_em_pastagens_na_frenteira_agricola_brasileira_Challenges_of_animal_production_in_pastures_in_the_Brazilian_agricultural_frontier/links/00b49533055801f73a000000.pdf>.

Acesso em 7 de fevereiro de 2017.

DIAS-FILHO, M. B. **Uso de pastagens para a produção animal no Brasil: estado da arte e a necessidade de intensificação de forma sustentável e ambientalmente adequada**. In: Da Silva, S.C.; Pedreira, C.G.S.; Moura, J.C. Simpósio sobre Manejo da Pastagem, 27., 2015, Piracicaba. Sistemas de Produção, Intensificação e Sustentabilidade da Produção Animal: Anais. Piracicaba: FEALQ, 2015. p. 7-31.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D. a.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. a.; BACCHI, O. O. S. Principles of crop modelling and simulation: III. modeling of root growth and other belowground processes, limitations of the models, and the future of modeling in agriculture. **Scientia Agricola**, v. 55, p. 58–61, 1998.

DSSAT. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)**. Disponível em:

<<https://dssat.net/about>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

EMBRAPA. Produção animal no Brasil: caracterização, simulação de cenários para pastagens e alternativas de adaptação às mudanças climáticas. p. 99, 2015.

EMBRAPA. ***Brachiaria brizantha* cv. Marandu**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/863/brachiaria-brizanthacv-marandu>>.

FONSECA, D. M. DA; MARTUSCELLO, J. A.; FARIA, D. J. G. Adubação em gramíneas do gênero *Brachiaria*: mitos e realidades. In: Viçosa, MG, Brasil. **Anais...** Viçosa, MG, Brasil: Simpósio Sobre Manejo Estratégico Das Pastagens, 2006.

GIJSMAN, A.J., HOOGENBOOM, G., PARTON, W.J., KERRIDGE, P.C. Modifying DSSAT for low-input agricultural systems, using a soil organic matter*/residue module from CENTURY. *Agronomy Journal* 94, 462/474, 2002.

GIRALDO, L.M., LIZCANO, L.J., GIJSMAN, A.J., RIVERA, B., FRANCO, L.H. Adaptation of the DSSAT model for simulation of *Brachiaria decumbens* production. In: International Symposium on Systems Approaches for Agricultural Development, 3, 2001, Lima, p. 14-14.

GRASSINI, P. **Science for food: yield gaps and sustainable intensification of agricultural systems**. Seminário Piracicaba, agosto de 2017. *Global Yield Gap Atlas (GYGA)*.

GOUVELLO, C. Brazil Low-carbon Country Case Study. **Brazil Low-carbon Country Case Study**, p. 270, 2010. Disponível em:

<http://siteresources.worldbank.org/BRAZILEXTN/Resources/Brazil_LowcarbonStudy.pdf>.

IMAFLOA, I. de manejo e certificação florestal e agrícola. **Boas práticas agropecuárias reduzem as emissões de GEE e aumentam a produção de carne na Amazônia**. 2016. Disponível em:

<https://www.pecsa.com.br/wp-content/uploads/2017/02/Boas-Praticas-Agropecuarias-Reduzem-as-Emissões-da-Pecuaria-de-Corte-na-Amazônia_IMAFLOA.pdf>.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. **The DSSAT cropping system model**. 2003. Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A.,

Wilkens, P.W., Singh, U., Gijssman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18, 235–265.

KELLY, T.C. **A bioeconomic system approach to sustainability analysis at the farm level**. 1995. 114 p. Tese (Ph.D. em Agronomia) University of Florida, Gainesville, 1995.

LAPIG, L. de P. de I. e G. **Dados Geográficos: mapa de pastagens**. Disponível em:

<http://maps.lapig.iesa.ufg.br/?layers=pa_br_areas_pastagens_250_2016_lapig>.

LICKER, R.; JOHNSTON, M.; FOLEY, J. A.; BARFORD, C.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDI, C.; RAMANKUTTY, N. Mind the gap: How do climate and agricultural management explain the “yield gap” of croplands around the world? **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, n. 6, p. 769–782, 2010.

MACEDO, M.C.M., ZIMMER, A.H., 1993. **Sistema pasto-lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária**. Simpósio sobre ecossistemas de pastagens. 2, pp. 216–245.

MARIN, F. R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos**. 2014. 2014.

MARIN, F. R. ; PILAU, G. P. ; SPOLADOR, H. F. S. ; OTTO, R. ; PEDREIRA, C. G. S.

Intensificação sustentável da agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. Ano XXV, n. 3, p. 108–124, 2016.

MAZZETTO, A. M.; FEIGL, B. J.; SCHILS, R. L. M.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Improved pasture and herd management to reduce greenhouse gas emissions from a Brazilian beef production system. **Livestock Science**, v. 175, p. 101–112, 2015. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2015.02.014>>.

PEDREIRA, B. C. E. Capim Xaraés sob pastejo : respostas agronômicas e morfofisiológicas , e adaptação do modelo CROPGRO para a predição de crescimento. p. 111, 2009.

PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; LARA, M. A. S.; ALDERMAN, P. D. Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. **Field Crops Research**, v. 120, n. 3, p. 370–379, 2011. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.010>>.

PEQUENO, D. N. L. University of São Paulo. **Agronomic performance and adaptation of the CROPGRO - Perennial Forage Model to predict growth of three tropical forage grasses under irrigated and rainfed conditions Piracicaba**. 2014.

PEQUENO, D. N. L.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J. Simulating forage production of Marandu palisade grass (*Brachiaria brizantha*) with the CROPGRO-Perennial Forage model. **Crop and Pasture Science**, v. 65, n. 12, p. 1335–1348, 2014.

RYMPH, S.J., BOOTE, K.J., IRMAK, A., MISLEVY, P., EVERS, G.W. Adapting the CROPGRO model to predict growth and composition of tropical grasses: developing physiological parameters. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings, Gainesville, v. 63, p.37–51, 2004.

SÃO PAULO, G. D. E. DE. **Levantamento censitário das unidades de produção agropecuária do Estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/>>. Acesso em: 15 maio. 2017.

SÃO PAULO, S. de A. e A. de. **São Paulo lança Projeto Integra SP (ILPF) para produção agropecuária e florestal**.

SÃO PAULO, S. de A. e A. de. **O Plano ABC é realidade em São Paulo**. [s.l: s.n.].

SOARES, F. A. de A. Universidade de São Paulo. **Zonas edafoclimáticas homogêneas das principais regiões de cana-de-açúcar do Brasil**. p. 166, 2015.

SPAROVEK, G.; ARAUJO, M.A.; RANIERI, S.B.L. **As pastagens e a agenda ambiental**. In: 28o Simpósio sobre Manejo da Pastagem, Piracicaba. Anais. Piracicaba: FEALQ, 2017.

STRASSBURG, B. B. N.; LATAWIEC, A. E.; BARIONI, L. G.; NOBRE, C. A.; DA SILVA, V. P.; THORNLEY J.H.M. and JOHNSON I.R. **Plant and crop modeling: a mathematical approach to plant and crop physiology**. Caldwell, NJ, USA: Blackburn Press, 1990.

VALENTIM, J. F.; VIANNA, M.; ASSAD, E. D. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil.

Global Environmental Change, v. 28, n. 1, p. 84–97, 2014. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001>>.

TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 50, p. 20260–20264, 2011. Disponível em: <<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1116437108>>.

UNFCCC. Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change. **Mainstreaming Adaptation to Climate Change: guidance and tools**, 2016.

Disponível em:

<http://unfccc.int/adaptation/nairobi_work_programme/knowledge_resources_and_publications/items/5457.php>.

USDA, U. S. D. of A. Livestock and Poultry : World Markets and Trade. 2018.

VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>>.

VAN WART, J.; VAN BUSSEL, L. G. J.; WOLF, J.; LICKER, R.; GRASSINI, P.; NELSON, A.; BOOGAARD, H.; GERBER, J.; MUELLER, N. D.; CLAESSENS, L.; VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. **Field Crops Research**, v. 143, p. 44–55, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.023>>.

3. POTENCIAL DE USO DOS MODELOS DE CULTURAS PARA DIRECIONAMENTO DE POLÍTICAS PÚBLICAS: UMA ANÁLISE ESPACIAL DA CONCESSÃO DO PROGRAMA ABC NO ESTADO DE SÃO PAULO

Resumo

Em um cenário global de mudanças climáticas, o Plano ABC está entre as políticas públicas brasileiras que buscam por práticas agropecuárias com melhores resultados no balanço de emissões de GEE, em especial aquelas que impulsionam a intensificação dos sistemas de produção. Este plano por meio do Programa ABC disponibiliza recursos financeiros que contribuem para intensificação do sistema pecuário, pelo subprograma Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD). O setor pecuário pode potencialmente contribuir para a redução das emissões de GEEs e minimizar a competição por terras entre a agricultura e os ecossistemas naturais. O presente capítulo teve como objetivo discorrer sobre a efetividade de aplicação dos recursos do subprograma RPD com base nas estimativas de *yield gap* explorável (Yg), definido com apoio de modelo de cultura, para quatro regiões do estado de São Paulo: Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e Votuporanga. Para tanto, o estudo adota uma abordagem alternativa ao conceito de pastagem degradada, geralmente relacionada a baixa lotação animal, ao considerar que alguns locais possuem maiores e outros menores condições, de acordo com o potencial biofísico, de obter incrementos de produtividade. Na região de Catanduva os recursos do ABC foram direcionados eficientemente, ou seja, a região possui elevados valores de Yg e permite uma maior aplicação de recursos ABC, o que efetivamente ocorreu. Para as regiões de Presidente Prudente e Votuporanga a aplicação do crédito ocorreu de maneira ineficiente, isto é, apresentam alta aplicação de crédito RPD, entretanto, há uma baixa oportunidade de incrementar a produtividade e elevar a produção dos pastos, uma vez que os valores de Yg é baixo para ambas. Já para a região de São Carlos observou-se que os recursos RPD são aplicados de forma insuficiente, de modo que há um elevado *yield gap* explorável, com boa oportunidade de incrementar a produtividade dos pastos e aumentar a produção de forragem, contudo, houve baixa aplicação do crédito. Os resultados sugerem, portanto, que parte do direcionamento dos recursos do Programa ABC estão bem ajustados, outra parte nem tanto, indicando que seu ajuste através de uma análise de *yield gap* proporcionada por modelagem mecanística pode criar um cenário mais favorável ao desempenho da tecnologia RPD.

Palavras-chave: Programa ABC; Recuperação de pastagem degradada; Yield gap explorável; Modelos de culturas

Abstract

In a global scenario of climate change, the ABC Plan is among the Brazilian public policies that seek agricultural practices with better results in the balance of GHG emissions, especially those that drive the intensification of production systems. Through the ABC Program, this plan provides financial resources that contribute to the intensification of the livestock system by the subprogram called Recovery of Degraded Pastures (RPD). The livestock sector can potentially contribute reduce GHG emissions and to minimize competition for land between agriculture and natural ecosystems. The present chapter aims

to discuss the effectiveness of the RPD subprogram use of resources based on the estimated yield gap (Yg), defined with support of crop model, for four regions of São Paulo State: Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos and Votuporanga. For this, the study adopts an alternative approach to the concept of degraded pasture, frequently related to low animal stocking, taking into account that some places have higher or lower conditions, according to the biophysical potential to obtain productivity increases. In the Catanduva region ABC resources were efficiently directed, i.e., the region has high values of Yg and allows a greater application of ABC resources, which actually occurred. For the regions of Presidente Prudente and Votuporanga, the credit application occurred inefficiently, i.e., they have a high RPD credit application, however, there is a low opportunity to increase productivity and increase pasture production, since the values of Yg is low for both. However, for the region of São Carlos it was observed that RPD resources are insufficiently applied, so that there is a high yield gap, with a good opportunity to increase pasture productivity and increase forage production. The results suggest, therefore, that part of the ABC Program resources are well adjusted, however, another part not so much, indicating that their adjustment through a yield gap analysis provided by mechanistic modeling can create a better scenario to the performance of RPD.

Keywords: ABC Program; Recovery of degraded pasture; Yield gap exploitable; Crop models

3.1 Introdução

O Brasil, segundo maior produtor agrícola do mundo, é uma das economias emergentes a desenvolver e incentivar a adoção de políticas setoriais para a promoção do equilíbrio entre a expansão agrícola, mitigação de emissões gases de efeito estufa (GEE) e proteção florestal (NEWTON; AGRAWAL; WOLLENBERG, 2013).

A pecuária bovina brasileira, especialmente de corte, ao ocupar uma vasta área de terras cultivadas em sistemas extensivos de produção e ao concentrar significativa participação nas emissões de GEEs do país, apresenta um elevado potencial para adoção de um modelo de baixa emissão de carbono e preservação de ecossistemas naturais (STRASSBURG et al., 2014). Com o aumento da eficiência de uso das áreas de pasto, o setor potencialmente pode contribuir para a redução das emissões de GEEs e possibilitar a liberação de áreas para a regularização ambiental (cumprimento do Código Florestal) ou para a produção agrícola, minimizando a competição por terras entre a agricultura e os ecossistemas naturais.

A intensificação da pecuária no Brasil é apresentada como necessária do ponto de vista das políticas públicas, por questões ambientais, sociais e de segurança alimentar, de modo que o direcionamento das políticas tem considerado planos e medidas voltados principalmente à recuperação de áreas de pastagens degradadas, como um componente da intensificação. O processo de degradação das pastagens é um fenômeno complexo relacionado a diversos fatores, tais como práticas inadequadas de manejo em áreas de baixa capacidade de suporte, resultando em queda na produtividade agrícola, além da diminuição da capacidade de acumular biomassa (produtividade biológica) (DIAS-FILHO,

2011). Apesar de não existirem estimativas oficiais que quantifiquem e apresentem a localização espacial das áreas que degradadas ou em algum estágio de degradação, sabe-se que um dos maiores gargalos da pecuária brasileira é o processo de degradação das pastagens. A recuperação de pastagens degradadas é, portanto, uma das etapas a serem vencidas para que se consiga aumento da eficiência produtiva.

Deve-se ter em mente que o conceito de pastagem degradada varia de acordo com o autor, porém em geral é fortemente pautado na baixa lotação animal ($UA.ha^{-1}$), o que nem sempre é uma premissa verdadeira, pois há áreas com baixa capacidade de suporte, em função de limitações físicas, mas que não se encontram necessariamente degradadas. Uma das alternativas das alternativas se dá com base uso de modelos mecanísticos ou de cultura que possibilitam uma definição espacial de áreas com maior potencial de intensificação, as quais podem ser entendidas como “degradadas”. Com isso, espera-se que os modelos mecanísticos possam agregar maior complexidade para predição de crescimento e desenvolvimento de culturas e com isso, auxiliar no melhor direcionamento de políticas públicas, a exemplo do Plano ABC.

O Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura - Plano ABC - está entre as políticas públicas brasileiras que buscam a redução do desmatamento e a implementação de tecnologias de mitigação e sequestro de Carbono, em especial aquelas que impulsionam a intensificação dos sistemas de produção. Este Plano iniciou um conjunto de iniciativas para a adoção de práticas que buscam melhores resultados no balanço de emissões de GEE pela agropecuária nacional, no contexto da 21ª Conferência das Partes (COP 21) da Convenção do Clima ocorrida em Paris no ano de 2015 (BRASIL, 2012).

O Plano ABC é uma política pública criada oficialmente pelo Decreto 7.390, de 9 de dezembro de 2010 e é composto por sete programas (BRASIL, 2012) seis deles referentes às tecnologias de mitigação da emissão de GEE e um com ações voltadas à adaptação às mudanças climáticas: Programa 1: Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD); Programa 2: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) e Sistemas Agroflorestais (SAFs); Programa 3: Sistema Plantio Direto (SPD); Programa 4: Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN); Programa 5: Florestas Plantadas (FP); Programa 6: Tratamento de Dejetos Animais (TDA); e Programa 7: Adaptação às Mudanças Climáticas (AMC).

Este Plano setorial possui um período de vigência de 10 anos (2010 a 2020) e sua abrangência é nacional, sendo previstas revisões e atualizações em períodos regulares não superior a dois anos, para readequá-lo às demandas da sociedade, às novas tecnologias e incorporar novas ações e metas, se necessário.

Mediante a Resolução BACEN nº 3.896/2010 foi possível a aprovação da linha de crédito rural denominada Programa ABC, que segue as indicações de financiamento sugeridas no Plano ABC, de

modo possibilitar o alcance das metas⁷ colocadas no plano setorial através do acesso a recurso financeiro aos produtores rurais, mas que por questões operacionais agregou vários outros programas que existiam no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). São subprogramas do Programa ABC: ABC Recuperação; ABC Orgânico; ABC Plantio Direto; ABC Integração; ABC Florestas; ABC Ambiental; ABC Tratamento de Dejetos; ABC Dendê e ABC Fixação Biológica de Nitrogênio. Além dessas linhas, também existe a ABC – FCO PRONATUREZA (Fundo Constitucional de Financiamento do Centro-Oeste) e o financiamento de orizicultura, da produção de dendê, de produtos orgânicos e o estímulo à produção de açaí, as quais receberam volume pouco representativo de recursos em comparação com as demais.

O financiamento do Programa ABC ocorre com recursos do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) e as operações são realizadas através das instituições financeiras credenciadas. Além disso, o Banco do Brasil está autorizado pelo governo federal a desembolsar recursos do Programa ABC, utilizando como fonte de recursos a Poupança Rural e recebendo a equalização de juros correspondente pelo Tesouro Nacional, diretamente (BACEN, 2016).

O Plano ABC no estado de São Paulo segue as mesmas diretrizes do plano nacional para construção de suas metas⁸ e entre os seus principais objetivos está ampliar a área de pastagens recuperadas, por meio da adoção de tecnologias que aumentem o teor de matéria orgânica no solo e a produtividade (SÃO PAULO, 2017). Com isso, o subprograma RPD do Programa ABC vem sendo adotado de modo a contribuir para o alcance desse objetivo.

O objetivo deste capítulo é avaliar o potencial de aplicação de modelos biofísicos de crescimento de culturas, especialmente os mecanísticos, para auxiliar o direcionamento de políticas públicas, como o Plano ABC. Ou seja, no presente estudo, para fins de análise da linha de crédito RPD (Recuperação de Pastagens Degradadas) do Programa ABC no estado de São Paulo, o termo “pastagem degradada” também pode ser entendido como áreas com lacunas de produtividade (*yield gaps*), isto é, passíveis de incremento na eficiência produtiva.

O objetivo específico do estudo é verificar se o volume de crédito liberado para recuperação de pastagem degradada (RPD) do Programa ABC no estado de São Paulo está sendo aplicado em regiões

---

⁷ (i) recuperar uma área de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas por meio do manejo adequado e adubação; (ii) Aumentar a adoção de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) e de Sistemas Agroflorestais (SAFs) em 4 milhões de hectares; (iii) ampliar a utilização do Sistema Plantio Direto (SPD) em 8 milhões de hectares; (iv) ampliar o uso da fixação biológica em 5,5 milhões de hectares; (v) Promover as ações de reflorestamento no país, expandindo a área com Florestas Plantadas, atualmente, destinada à produção de fibras, madeira e celulose em 3,0 milhões de hectares, passando de 6,0 milhões de hectares para 9,0 milhões de hectares; e (vi) ampliar o uso de tecnologias para tratamento de 4,4 milhões de m³ de dejetos de animais para geração de energia e produção de composto orgânico (BRASIL, 2012).

⁸ (i) Recuperar 200 mil hectares (ha) de pastagens degradadas; (ii) aumentar áreas com ILPF em 200 mil ha; (iii) aumentar áreas com Sistemas de Plantio Direto e de Cultivo Reduzido em 1 milhão de ha; (iv) aumentar áreas com FBN em 800.000 ha; (v) promover um incremento na área de florestas plantadas da ordem de 50 mil ha por ano, totalizando 200 mil ha até o ano 2020; e (vi) promover o processamento de 200 mil metros cúbicos de dejetos animais e de 2 milhões de metros cúbicos de subprodutos do setor canavieiro como a vinhaça e a palhada (SÃO PAULO, 2017).

de maior potencial para incremento de produtividade, com base nos valores dos *yield gaps* identificados a partir de simulações de crescimento da *Brachiaria brizhanta* (capítulo anterior) no modelo *CROPGRO Perennial Forage*.

A importância deste tipo de análise está na possibilidade de mostrar que este tipo de ferramenta (modelos de culturas) pode melhor direcionar tomadores de decisão quanto a políticas e medidas voltadas à intensificação sustentável da pecuária. Isto porque este processo demanda: (i) pela identificação de regiões com maior potencial (em termos de solo, clima, relevo, genética da planta, etc.) para incremento de produtividade (maiores *yield gaps*) sem ultrapassar a capacidade de suporte do ambiente, portanto com alto potencial de retorno quanto à aplicação da política; (ii) pela identificação das áreas que estão no seu limite produtivo e já com baixa produtividade e, por consequência, sem espaço para incrementos de produtividade, de modo que o uso de recursos advindos de políticas públicas traria um baixo retorno.

3.2 Revisão bibliográfica

3.2.1 Intensificação sustentável da pecuária

De acordo com Sparovek; Araújo; Ranieri (2017), caso não ocorram mudanças importantes nas próximas décadas, especialmente nos padrões de produção e consumo atuais do planeta, será preciso duplicar a produção agropecuária em termos funcionais até a população estabilizar em 10 bilhões de pessoas. Para suprir a demanda por produtos agropecuários da crescente população, em algumas décadas seria preciso produzir o dobro de proteína, energia metabolizável e energia não metabolizável para atender o consumo humano, animal e a demanda por energia vinda da agricultura.

Segundo Foley et al. (2011), é perceptível que para suprir essa demanda o caminho dado pela expansão da área em produção agropecuária nos moldes da produção atual não é possível, uma vez que a agropecuária é considerada o setor produtivo que mais contribui para as mudanças climáticas globais, para a perda de biodiversidade, e para a degradação das terras e da água.

Nesse aspecto, a contribuição da pecuária de corte é significativa. No caso do Brasil, cerca de 65% das emissões totais provenientes do setor agropecuário brasileiro são advindas dessa atividade, e devem-se especialmente ao processo de fermentação entérica dos animais e da decomposição de seus dejetos com a liberação de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (IMAFLOA, 2016). Além disso, a literatura aponta que com o avanço do processo de degradação dos solos sob pastagem, verifica-se a perda de cobertura vegetal e a redução no teor de matéria orgânica do solo, promovendo a liberação de CO₂ para atmosfera (OBSERVATÓRIO, 2017a), o que representa cerca de 200 MtCO₂ e ainda não contabilizados no inventário nacional de emissões (SEEG, 2016 *apud* IMAFLORA, 2016).

Diante desses impactos, Foley et al. (2011) apresentam alguns pilares sobre os quais se sustentariam as mudanças necessárias para o atendimento das demandas globais por produtos

agropecuários de modo sustentável: (i) parar ou desacelar a expansão da área em produção agropecuária, (ii) fechar lacunas de produtividade “*yield gap*”, (iii) aumentar a eficiência da agricultura quanto ao uso de recursos, (iv) aumentar a eficiência das dietas e (v) diminuir as perdas de pós-colheita, na comercialização e no consumo. As mudanças (iv) e (v) em grande parte dependem do consumidor e em sua maioria, vão na contramão da tendência esperada (SPAROVEK; ARAÚJO; RANIERI, 2017). Já as mudanças de (i) a (iii) estão mais ligadas à produção e em parte já estão em curso, mas precisam ser amplificadas, melhor direcionadas e aceleradas, especialmente por intermédio de políticas públicas. Além disso, tais mudanças também fazem parte dos temas que permeiam as discussões sobre intensificação sustentável da pecuária.

Ao invés de abrir novas áreas para implantação de pastagens, a intensificação sustentável tem sido apresentada como uma alternativa para o alcance de uma maior eficiência produtiva tanto em termos de aumento de produtividade como quanto ao uso de menor quantidade de área. Vale ressaltar que apesar da intensificação sustentável ser definida como um processo ou sistema onde as produtividades são aumentadas sem impacto ambiental adverso e sem a abertura de novas áreas (ROYAL SOCIETY, 2009), é notório que os tomadores de decisão devem levar em consideração um conjunto mais amplo de motivações, prioridades e objetivos do que apenas o aprimoramento da produtividade (PRETTY; BHARUCHA, 2014).

Na Tabela 6 são apresentadas as soluções sugeridas por Foley et al. (2011), ligadas à produção agrícola mundial, adaptadas no contexto desse estudo ao cenário atual das pastagens no Brasil, conforme discutido em Sparovek; Araújo; Ranieri (2017), sendo, portanto, aplicável ao estado de São Paulo, especialmente sobre uma intensificação sustentável da pecuária.

Tabela 6. Soluções sugeridas por (Foley, et al. 2011) para o sistema de produção agrícola mundial e sua adaptação à realidade das pastagens brasileiras

Solução	Objetivos	Mecanismo	Ações existentes (E) e Demandas (D)
Parar/desacelerar a expansão da área de pastagens	Reduzir emissões de GEE, perda de biodiversidade, serviços ambientais e degradação de terras. Estimular a intensificação sustentável e ganho de produtividade.	• Comando e Controle (C&C): Leis, regulamentos, licenças • Voluntários de mercado: moratórias, compromissos de eliminação do desmatamento em cadeias de custódia e certificações.	• Código Florestal; SNUC; PNMC (E); • Zoneamentos Ecológico Econômicos – ZEE (E); • Planos diretores municipais (E); • REDD+ (E); • Programas de certificação (FSC, RAS) (E); • Moratória da soja e da carne (E); • Acordos climáticos internacionais (E)
Aumentar a eficiência em áreas de maior Yield gap	Melhorar a eficiência produtiva em áreas com potencial (biofísico) para aumentar a produção de forragem, ou seja, fechar lacunas de produtividade (<i>em áreas de maior yield gap explorável</i>)	• Mapeamento do potencial biofísico de crescimento da pastagem; • Quantificação do <i>yield gap</i>; • Desenho de alternativas regionalizadas para fechar os maiores gaps de produtividade; • Formulação de política pública	• As áreas ocupadas com pastagens degradadas ou em estado de degradação ainda não são efetivamente conhecidas (quantitativamente e espacialmente), considerando um modelo biofísico (D). Plano ABC com a linha RPD - maior volume de crédito via Programa ABC. O Programa possui efetividade no tange ao fechamento dos maiores <i>gaps</i> de produtividade? (D) • Incertezas com relação ao direcionamento de tais áreas (maior gap) para o processo de intensificação (D)
Aumentar a eficiência no uso de recursos para produção	Fechar lacunas de produtividade acoplada a soluções mais eficientes e sustentáveis para o uso de recursos (água, agroquímicos, etc)	• Incentivar a adoção de uma tecnologia feita em outras bases, sem apenas ser movida pelo interesse privado; • Melhoria em cultivares de forragens tropicais; • Melhoria na genética de rebanho • Orientação técnica (ATER) para uso sustentável de insumos; • Melhorias nos sistemas de manejo (ex. adoção de iLPF)	• Ainda há baixa capacitação de técnicos de extensão rural e carência de orientação técnica aos produtores sobre o uso sustentável dos recursos; (D) • Investimentos com pesquisas em sistemas de manejo, adaptação e melhoria genética de forragens e raças de animais tem sido conduzido em universidades e centros de pesquisa (ex Embrapa) (E); • Plano ABC: política pública de incentivo à mudança de sistemas de manejo (iLPF) e melhoria genética (E);

(i) Expansão de área

Em longo prazo, a expansão da pecuária no Brasil, em especial a bovinocultura de corte sob sistema extensivo possui efeitos ambientais negativos sobre ecossistemas sensíveis. Estudos apontam que em regiões tropicais, onde há desmatamento, o balanço entre ganhos de produção e as perdas de carbono não é compensador (WEST et al., 2010). Com isso, desacelerar e, se possível, parar com o processo de expansão de áreas destinadas à pastagem é colocado como uma tendência que pode contribuir para a redução das emissões de GEE, perda de biodiversidade, serviços ambientais e degradação de terras (STRASSBURG et al., 2014)

Essa tendência pode ser alcançada através de diversos mecanismos de Comando e Controle (C&C): leis, regulamentos, licenças; mecanismos voluntários de mercado como moratórias, compromissos de eliminação do desmatamento em cadeias de custódia e certificações.

No Brasil, os mecanismos de Comando e Controle existentes incluem o Novo Código Florestal (Lei 12.651/2012), o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), a Política Nacional de

Mudanças do Clima (PNMC), além de instrumentos de ordenação territorial em escala nacional, estadual e municipal, como os Zoneamentos Ecológico Econômicos – ZEE e os Planos Diretores Municipais. Além disso, os acordos climáticos internacionais estimulam medidas de redução, mitigação e adaptação a mudanças do clima, entre as quais está o controle e redução das taxas de desmatamento e intensificação da pecuária. Em âmbito nacional, destacam-se políticas públicas como o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura - Plano ABC.

Entre os mecanismos econômicos estão programas de certificação de mercado, como o do Forest Stewardship Council (FSC), da Rain Forest Alliance Certificate (RAS), o programa de Redução de Emissões de Desmatamento e Degradação (REDD+), e acordos entre produtores, Organizações Não Governamentais (ONGs) e governo, como a moratória da soja e da carne. Estes mecanismos têm apresentado respostas positivas na lucratividade de pecuaristas em regiões de fronteira agrícola. Acordos, como a moratória da carne, por exemplo, facilitam às empresas regularizadas o recebimento de incentivos para investimentos através do acesso a crédito, fomento e assistência técnica, regularização das áreas e ações que provocam aumento da segurança jurídica em toda a cadeia produtiva. A certificação agrícola agrega valor ao produto, porém ainda é concentrada em produtores mais capitalizados.

Entretanto, apesar dos diversos mecanismos existentes, nem todos são eficazes para garantir a não expansão das áreas de pastagem sobre áreas naturais. Fatores como o estímulo a intensificação sustentável e ganhos de produtividade podem contribuir para a eficácia de mecanismos para controle de expansão de área.

(ii) Aumento da eficiência produtiva

Para uma intensificação sustentável da pecuária é preciso que se considere a identificação de regiões com maior potencial biofísico para aumentar a produção de forrageiras e por consequência, a lotação animal; ou por outro lado, das áreas que estão no seu limite produtivo e, por consequência, sem espaço para incrementos de produtividade não sendo, portanto, passível de um processo de intensificação.

Como apresentado no capítulo II, a identificação de yield gaps pode ser realizada pela diferença entre a produtividade atual (Y_w , aquela observada em situações reais nas propriedades rurais), e a produtividade potencial (Y_p) ou ainda pela produtividade atingível, a qual é limitada apenas por deficiência hídrica (VAN ITTERSUM et al., 2013; MARIN, 2014). Considerando as soluções sugeridas por Foley et al. (2010), dois cenários seriam possíveis através da identificação dos yield gaps das pastagens: (i) melhorar a eficiência produtiva em áreas onde a produtividade real é baixa e que, por outro lado, possuem uma elevada produtividade potencial (considerando as condições biofísicas de

desenvolvimento da pastagem), permitindo a liberação de áreas para a produção agrícola, por exemplo; e (ii) identificar as áreas que possuem baixa produtividade (pequeno yield gap explorável) e já estão no seu máximo potencial produtivo e, por consequência, sem possibilidade para incrementos de produtividade, as quais poderiam ser aproveitadas para regularização ambiental (via restauração florestal).

Os mecanismos que possibilitariam mapear esses cenários são: (i) identificação do potencial biofísico de crescimento da pastagem; (ii) identificação de áreas com produtividade abaixo do potencial (degradadas ou em algum estágio de degradação) e quantificação do yield gap; (iii) desenho de alternativas regionalizadas para fechar os maiores gaps de produtividade; (iv) formulação de política pública voltada especificamente a áreas de pastagens de baixa produtividade e de maiores yield gaps para melhor aproveitamento dessas áreas.

Apesar de declaradas no Censo Agropecuário de 2006 do IBGE pelos produtores, a área ocupada com pastagens degradadas ou em estado de degradação ainda não é efetivamente conhecida (quantitativamente e espacialmente). Há também a questão da conceituação de "pastagem degradada", que precisa ser melhor definida, como discutido anteriormente. Apesar de alguns estudos (ex.: STRASSBURG, 2014), ainda não há consenso sobre a distribuição espacial das pastagens degradadas que permita identificar as melhores áreas passíveis de recuperação (onde há maiores gaps de produtividade). O Plano ABC, embora seja uma iniciativa promissora para o fechamento desses gaps e englobe metas ambiciosas, tais como a recuperação de 15 milhões hectares de pastagens degradadas em todo o país até 2020, sendo 200 mil hectares no estado de São Paulo, oferecendo o maior volume de crédito via Programa ABC (especialmente através da linha Recuperação de Pastagens Degradadas - RPD), ainda não conta com apoio de estudos que confirmem a efetividade das ações por ele propostas no que tange ao fechamento dos maiores gaps de produtividade das pastagens, ou seja, que permitam avaliar se as metas e a aplicação de recursos estão direcionadas aos locais com maior oportunidade de atingir melhores resultados.

Este estudo parte do pressuposto de que o mapeamento das áreas com maiores yield gaps permitiria direcionar com maior assertividade políticas públicas e investimentos voltados à pecuária, especialmente bovinocultura de corte, a exemplo do Programa ABC aqui analisado. O conceito de eficiência produtiva ou alternativamente yield gap é visto, portanto, como promissor para subsidiar tomadas de decisão que busquem a diminuição dos impactos ambientais das pastagens e permitam a expansão da produção agrícola sem novos desmatamentos.

(iii) Aumentar a eficiência no uso dos recursos na produção

Construir caminhos sustentáveis para o processo de intensificação da pecuária é necessário, de modo que o aumento de produtividade ocorra em paralelo ao uso mais eficiente dos recursos: água, solo, nutrientes e produtos químicos. O modelo atualmente predominante de produção agropecuária no geral, e na produção pecuária em específico, associa o incremento da produtividade à maior utilização de recursos tecnológicos e insumos. A expansão para áreas de pastagem para locais de clima e solo mais marginais potencializa este efeito. Este modelo produtivo, em que cada quilograma de produto final é produzido com cada vez mais insumos, tecnologia e mecanização impulsiona a degradação dos recursos naturais e as mudanças climáticas. Ao mesmo tempo, a orientação técnica para maior eficiência e sustentabilidade no uso desses recursos ainda é escassa.

A análise de eficiência produtiva das culturas pela definição de *yield gap* pode contribuir para o aumento de eficiência também no uso de recursos produtivos, ou seja, regiões com pequena margem de *yield gap* explorável indicariam inviabilidade de um processo de intensificação, evitando o uso em excesso de nutrientes que causam problemas ambientais; por outro lado, regiões de maiores *yield gaps* exploráveis indicariam viabilidade no uso mais eficiente de nutrientes e demais recursos, de modo a fechar com maior assertividade as lacunas de produtividade.

Com base na identificação de áreas com maiores ou menores *yield gaps*, programas de assistência técnica e extensão rural (ATER), especialmente pelo setor público, podem ser incrementados e melhorados, focando em áreas onde possivelmente faça maior sentido incrementar produtividade e adotando tecnologias, sistemas de manejo e formas mais sustentáveis de utilização dos recursos naturais.

Existem diversos exemplos de nichos de modelos de produção que podem tornar o produtor menos dependente do pacote tecnológico tradicional oferecido por muitos serviços de ATER, altamente dependente do uso intensivo de agroquímicos e de recursos naturais. Entre eles estão os investimentos com pesquisas em sistemas de manejo, adaptação e melhoria genética de forragens e raças de animais, os quais são conduzidos em universidades e centros de pesquisa. Além disso, no Brasil, como já citado, há uma política pública de incentivo à mudança de sistemas de manejo, o Plano ABC. Entretanto, apesar do avanço nas medidas que contribuem para o aumento da eficiência no uso de recursos para a produção, o impacto dessas medidas ainda é um tanto limitado dada a abrangência espacial e a importância do setor pecuário no país. Neste sentido, tanto políticas de financiamento, ATER ou de pesquisa voltadas a melhorias de desempenho deste setor podem ser potencialmente melhor direcionadas se construídas com o auxílio de metodologias como a definição de *yield gaps* por modelos biofísicos.

3.2.2 – Plano ABC e Programa ABC

Acentuado pelas atividades antrópicas principalmente pós Revolução Industrial, o aumento da temperatura média global, bem como as ações para sua mitigação e para a adaptação aos seus impactos,

têm sido pauta de fóruns mundiais e tema cada vez mais discutido pela comunidade científica internacional (SPAROVEK; ARAUJO; RANIERI, 2017). O Brasil é um dos países a discutir medidas para mitigar e se adaptar às mudanças climáticas, tendo assumido voluntariamente compromissos de redução de Gases de Efeito Estufa (GEE) durante a 15ª Conferência das Partes (COP15), em 2009, os quais estão previstos na legislação que institui e regulamenta a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC (Lei 12.187/2009). Para alcançar os objetivos da PNMC, o Brasil se comprometeu a reduzir suas emissões GEE entre 36,1% e 38,9% até 2020 com base nas emissões de 2005 (BRASIL, 2012).

Passados seis anos da COP15, foi realizada em Paris a COP21, onde, entre os principais temas discutidos, estava a redução das emissões de GEE com o objetivo de manter o aumento da temperatura média global em níveis inferiores a 2°C e de mirar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (BRASIL, 2016). O acordo ratificado por 195 partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, sigla em inglês) e pela União Europeia, foi convertido em Contribuições Pretendidas Nacionalmente Determinadas (iNDC, sigla em inglês), na qual o Brasil se propôs a uma meta adicional de redução de 43% de suas emissões em 2030, em relação às de 2005. Em setembro de 2016 o Brasil ratificou o Acordo de Paris, tornando a contribuições “pretendidas” (intended) em compromisso oficial, cuja sigla passou a ser NDC.

Concebido a partir dos resultados dos inventários feitos em 1996 e 2006 pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, que evidenciaram que as atividades agropecuárias eram responsáveis por importante parcela das emissões brasileiras de GEE, o “Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura - Plano ABC” foi criado pelo Decreto 7.390/2010, e prevê a realização das ações de mitigação e adaptação no período de 2010 a 2020 (BRASIL, 2012).

O Plano ABC tem o objetivo de garantir o aperfeiçoamento contínuo e sustentado dos sistemas de produção que reduzam a emissão dos GEE. A motivação do Plano ABC foi a busca por práticas agropecuárias com melhores resultados no balanço de emissões, ou seja, reduzir as emissões na agropecuária em cerca de 134 milhões a 163 milhões de toneladas de CO₂ equivalente por meio de práticas e tecnologias capazes de aumentar tanto a eficiência da produção, quanto o uso dos recursos naturais (OBSERVATÓRIO ABC, 2017a)

Os principais alvos do Plano ABC são a redução do desmatamento, a recuperação de pastagens degradadas em todo o país, a adoção do sistema de plantio direto e o aumento da fixação biológica de nitrogênio. A escolha destes alvos foi baseada em três aspectos centrais: (i) a maior escala dos empreendimentos; (ii) a importância econômica das atividades; e, (iii) a alta eficiência dessas ações na redução de emissões de GEE. Para viabilizar a adoção do Plano ABC, a linha de crédito Programa ABC, fomentada pelo Banco Nacional do Desenvolvimento - BNDES, vem oferecendo recursos para financiar a adoção de ações propostas na esfera do Plano.

Para tanto, o Plano é composto por sete programas (BRASIL, 2012), seis deles referentes às tecnologias de mitigação da emissão de GEE, e um com ações voltadas à adaptação às mudanças climáticas:

- Programa 1: Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD);
- Programa 2: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) e Sistemas Agroflorestais (SAFs);
- Programa 3: Sistema Plantio Direto (SPD);
- Programa 4: Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN);
- Programa 5: Florestas Plantadas (FP);
- Programa 6: Tratamento de Dejetos Animais (TDA);
- Programa 7: Adaptação às Mudanças Climáticas (AMC).

O Plano ABC possui abrangência nacional e seu período de vigência é de 2010 a 2020, sendo previstas revisões e atualizações em períodos regulares não superior a dois anos, para readequá-lo às demandas da sociedade, às novas tecnologias e incorporar novas ações e metas, caso se faça necessário.

Como exemplo dessas ações, o Plano ABC propõe metas ambiciosas para o segmento, como a recuperação de 15 milhões hectares de pastagens degradadas, a ampliação do uso de tecnologias para tratamento de 4,4 milhões de m³ de dejetos animais e a adoção de 4 milhões de hectares em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta – iLPF (BRASIL, 2012). A essa última foi acrescido mais 1 milhão de hectares na NDC, em 2016.

Já o Programa ABC é uma linha de crédito aprovada mediante a Resolução BACEN nº 3.896 de 17/08/10, que segue as indicações de financiamento sugeridas no Plano ABC, mas que por questões operacionais agregou vários outros programas que existiam no Ministério da Agricultura. Posteriormente, o Programa ABC foi ainda complementado pela resolução BACEN nº 3.979 de 31/01/2011, o que ampliou ainda mais a abrangência dos financiamentos. O Programa ABC é financiado com recursos do BNDES e as operações são realizadas através das instituições financeiras credenciadas.

O Programa ABC financia empreendimentos nas seguintes modalidades:

- Recuperação de pastagens degradadas (ABC Recuperação);
- Implantação de sistemas orgânicos de produção agropecuária (ABC Orgânico);
- Implantação e melhoramento de sistemas de plantio direto "na palha" (ABC Plantio Direto);
- Implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária, lavoura-floresta, pecuária-floresta ou lavoura-pecuária-floresta e de sistemas agroflorestais (ABC Integração);
- Implantação, manutenção e melhoramento do manejo de florestas comerciais, inclusive aquelas destinadas ao uso industrial ou à produção de carvão vegetal (ABC Florestas);

- Adequação ou regularização das propriedades rurais frente à legislação ambiental, inclusive recuperação da reserva legal, de áreas de preservação permanente, recuperação de áreas degradadas e implantação e melhoramento de planos de manejo florestal sustentável (ABC Ambiental);
- Implantação, manutenção e melhoramento de sistemas de tratamento de dejetos e resíduos oriundos de produção animal para geração de energia e compostagem (ABC Tratamento de Dejetos);
- Implantação, melhoramento e manutenção de florestas de dendezeiro, prioritariamente em áreas produtivas degradadas (ABC Dendê);
- Estímulo ao uso da fixação biológica do nitrogênio (ABC Fixação Biológica de Nitrogênio).

Os itens financiáveis pelo Programa ABC, bem como as regras para limite de crédito, taxas de juros e forma de reembolso estão descritos no Manual de Crédito Rural do Banco Central do Brasil – MCR, disponível em <<http://www3.bcb.gov.br/mcr/>>.

Foram disponibilizados R\$ 20,5 bilhões de crédito aos produtores rurais desde o lançamento do Programa ABC até o ano-safra 2015/16, sendo que somente R\$ 13,8 bilhões de recursos foram contratados até o final do ano-safra 2015/16, segundo o Observatório ABC (2016).

É importante salientar que o Brasil praticamente já alcançou as metas estabelecidas durante a COP15 com a redução em 41,1% das emissões de gases poluentes entre 2005 e 2012, passando de 2,1 bilhões de toneladas de CO₂eq para 1,2 bilhão de CO₂eq, o que deve-se principalmente à redução em 79% no desmatamento na Amazônia legal, entre 2004 e 2015 (BRASIL, 2015). Essa redução representa significativo avanço em relação ao alcance da meta assumida pelo Brasil em 2009, a qual poderá ser completamente alcançada pelas demais políticas de redução de emissão de GEE que o país propôs nos planos setoriais, entre eles o Plano ABC.

Porém, o desafio para o Brasil neste momento é alcançar a meta de redução de emissão de GEE em 43% até 2030 abaixo dos níveis de emissão de 2005, como o firmado na COP21. Uma vez que as reduções provavelmente não virão, a partir de agora, essencialmente da redução do desmatamento (esses, embora tenham apresentado ligeiro aumento nos últimos meses (INPE, 2016), devem continuar em taxa decrescente e contribuir de forma marginal para a redução das emissões), as áreas de pastagens, especialmente as de bovinocultura de corte, deverão protagonizar as principais ações a serem tomadas para o alcance desse objetivo.

3.3 Material e Métodos

3.3.1 Análise espacial da concessão de financiamento do Programa ABC

Para avaliar o potencial de aplicação de modelo mecanístico de cultura, especialmente o modelo CROPGRO Perennial Forage, para auxiliar o direcionamento de políticas públicas voltadas à

intensificação da pecuária bovina, tomando como exemplo o Plano ABC no estado de São Paulo, o presente estudo realizou, primeiramente, uma análise espacial da concessão de financiamento do Programa ABC neste estado.

O banco de dados de concessão de financiamentos do Programa ABC foi cedido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e é disponibilizado pelo Sistema de Operações do Crédito Rural e Proagro (SICOR). As informações disponibilizadas compreendem, entre outras, dados de volume de crédito, área e número de contratos por subprograma do Programa ABC, a saber: Adequação e/ou Regularização Ambiental, Fixação Biológica de Nitrogênio, Florestas, Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e Sistemas Agroflorestais, Plantio Direto, Recuperação de Pastagens Degradadas, Sistemas Orgânicos e Tratamentos de dejetos animais.

O banco de dados analisado foi disponibilizado para todos os municípios brasileiros onde houve concessão de financiamentos pelo programa no período janeiro de 2013 a abril de 2017, ou seja, apesar de não incluir a totalidade dos financiamentos, abarca um número significativo de contratos obtidos até o momento. Entretanto, para o alcance dos objetivos deste capítulo, apenas a subprograma RPD foi considerada nas tabulações e para o estado de São Paulo, objeto de estudo.

Com o banco dados do subprograma RPD consolidado, foi possível uma análise estatística e espacial descritiva das variáveis quantitativas dos financiamentos. As variáveis quantitativas utilizadas foram: número de contratos, volume de crédito (em reais) e área contemplada nos contratos.

3.3.2 Eficiência da aplicação dos recursos do subprograma RPD do Programa ABC

Os resultados do capítulo anterior levaram à definição da eficiência produtiva (produtividade real/produtividade atingível) das áreas de pasto no estado de São Paulo, bem como o *yield gap* explorável (diferença entre a produtividade atingível, descontando 20% do seu valor, e a produtividade real destas áreas).

O principal objetivo do presente capítulo foi verificar se o volume de crédito liberado para Recuperação de Pastagem Degradada (RPD), subprograma do Programa ABC, no estado de São Paulo, foi direcionado para regiões de maior potencial para incremento de produtividade da pecuária, em termos de produção de pastagem. A geografia das áreas com maior e menor eficiência na aplicação dos recursos foi analisada com base na produtividade atingível (Y_w) das pastagens, identificada a partir de simulações de crescimento da *Brachiaria brizhanta* cv Marandu (capítulo anterior) no modelo *CROPGRO perennial Forage*, e na produtividade real (Y_r), estimada a partir de dados do Censo Agropecuário de 2006 e Levantamentos da Produção Pecuária Municipal (PPM) do IBGE.

O modelo adotado para abordar a eficiência da aplicação dos recursos da linha RPD no estado de São Paulo é uma adaptação do que foi desenvolvido no estudo “*Análise e Planejamento Territorial, Projeções e Estratégias para a Agricultura Familiar Brasileira*” (NEAD, 2015) para avaliar o desempenho na agricultura familiar nas principais cadeias produtivas. Para este estudo, o modelo foi

adaptado de modo a considerar como variáveis os valores de *yield gap* explorável e volume de crédito acessado pela linha RPD.

O modelo adaptado parte do pressuposto de que, territorialmente, as potencialidades biofísicas para o desenvolvimento das pastagens, bem como as condições reais de produção, são variáveis. Com isso alguns locais possuem maiores e outros menores condições de obter incrementos de produtividade através de um processo melhorias e recuperação.

Nesse sentido, a eficiência na aplicação dos recursos para Recuperação de Pastagens Degradados (RPD) do Programa ABC será maior quando esses recursos forem aplicados em áreas de maiores *yield gaps*. Assim, foram categorizadas 4 classes territoriais de eficiência na aplicação de recursos, resultantes das combinações espaciais entre *yield gap* explorável (*Yg*) e **aplicação de recursos em RPD**, onde: o *yield gap* explorável das pastagens aponta as regiões com maior ou menor lacuna de produtividade (diferença de Y_w e Y_r), indicando, portanto, áreas com maior ou menor potencial de incremento de produtividade; enquanto a **aplicação de recursos** se refere ao volume de crédito, em reais, liberado no contingente do Programa ABC para a recuperação de áreas de pastagens degradadas por região, as mesmas selecionadas para a análise de *yield gap* do capítulo anterior. A descrição das classes territoriais geradas a partir do cruzamento entre o mapa de distribuição de *Yg* e o mapa de aplicação do crédito RPD encontra-se a seguir:

Grupo 1- aplicação eficiente: situação na qual o *yield gap* explorável da região é elevado, ou seja, há grande oportunidade de incrementar a produtividade dos pastos e aumentar a produção de forragem por hectare/ano e, adicionalmente, na região houve aporte de recursos via Programa ABC - modalidade RPD. Ou seja, são regiões onde se espera uma boa aplicação dos recursos, por possuir um elevado *Yg*, e essa aplicação realmente aconteceu.

Grupo 2 – aplicação insuficiente: neste grupo estão regiões onde também se observa um elevado *yield gap* explorável, com boa oportunidade de incrementar a produtividade dos pastos e aumentar a produção de forragem por hectare/ano, entretanto, houve baixa aplicação dos recursos via Programa ABC - modalidade RPD. Nesta classe territorial, apesar de ocorrer uma significativa lacuna de produtividade, os recursos disponíveis foram aplicados de forma insuficiente. Esta situação, portanto, indica a necessidade de ajuste entre potencial de melhoria de produtividade e oferta de recursos via Programa ABC, permitindo um melhor direcionamento dessa política pública.

Grupo 3 - aplicação suficiente: em uma lógica inversa ao apresentado no grupo 1, esta classe territorial apresenta uma situação na qual o *yield gap* explorável da região é baixo, ou seja, há pouca oportunidade de incrementar a produtividade dos pastos e aumentar a produção de forragem por hectare/ano e, adicionalmente, poucos recursos do Programa ABC – modalidade RPD foram direcionados a essa região. Logo, nessas condições, espera-se que o direcionamento de recursos seja baixo, e ele realmente foi.

Grupo 4 – aplicação ineficiente: situação em que se observa baixo *yield gap* explorável, isto é, pequena oportunidade de incrementar a produtividade ou aumentar a produção dos pastos, e a elevada aplicação de recursos do Programa ABC – modalidade RPD.

A Figura 24 ilustra os dois pressupostos associados ao uso deste modelo, sendo eles: (i) uma relação entre os valores de *yield gap* explorável (eixo x) e a aplicação dos recursos RPD (eixo y) define quatro grupos básicos de interação, cada qual localizado em um quadrante do gráfico; e (ii) cada um dos eixos são definidos não a partir dos valores absolutos de *yield gap* explorável (eixo x) e aplicação dos recursos ABC em volume (eixo y), mas sim através das zonas climáticas homogêneas definidas para as simulações e extrapolação espacial no Capítulo anterior.

Figura 24. Representação teórica da composição dos grupos ou classes territoriais elaboradas a partir da dinâmica entre *yield gap* explorável (Yg) e a aplicação dos recursos do subprograma RPD do Programa ABC.

Processamento do modelo territorial e mapeamento dos grupos territoriais

Os valores de *yield gap* explorável estimados para cada uma das regiões, apresentados no Capítulo 1, são aqui replicados. Portanto, a mesma escala adotada no capítulo anterior é levada em consideração no delineamento das classes territoriais de eficiência na aplicação de recursos.

Logo, as regiões analisadas quanto à eficiência na aplicação de recursos para o estado de São Paulo foram: Votuporanga, Catanduva, Presidente Prudente e São Carlos. Tais localidades, como apresentado no capítulo anterior, são significativas em termos de representatividade das áreas de pastagens, contemplando cerca de 76% de toda área de pasto desse estado.

Os valores de *yield gap* explorável para cada município do estado de São Paulo foi definido através de uma extrapolação dos valores obtidos regionalmente, ou seja, assumiu-se que, em média, o Yg do município é o mesmo daquele obtido para a sua respectiva região. Os resultados foram posteriormente vinculados ao banco de dados de aplicação dos recursos do subprograma RPD do Programa ABC, de modo a permitir uma representação espacial da eficiência desses recursos através das classes territoriais de desempenho.

3.4 Resultados e Discussões

3.4.1 Análise espacial do subprograma RPD do Programa ABC

O banco de dados do SICOR revela que o Programa ABC, desde seu lançamento durante o Plano Safra 2010/11 até junho de 2016, contabilizou cerca de R\$ 13,8 bilhões contratados, dos R\$20,5 bilhões disponibilizados até 2016 para financiar as tecnologias de baixa emissão de carbono (OBSERVATÓRIO ABC, 2017a).

Os mapas apresentados pelas Figuras 25 mostram a distribuição do valor absoluto das variáveis número de contratos, área dos contratos (ha) e volume de crédito concedido nos contratos (R\$) no que tange ao subprograma Recuperação de Pastagem Degradada (RPD) em todo Brasil. Um recorte para o estado de São Paulo, objeto de estudo, é apresentado na Figura 26 para as mesmas variáveis.

O objetivo de mostrar a distribuição das variáveis relacionadas ao subprograma RPD de cada município é de explicitar os padrões regionais de concentração de financiamentos do Programa ABC. Esse tipo de análise permite localizar geograficamente onde o Programa ABC teve maior aplicação em escala regional e nacional. Ao mesmo tempo permite identificar vazios na cobertura espacial deste Programa.

Para o período analisado, o subprograma RPD abrangeu cerca de 5,6 mil contratos, e 1,6 bilhões de reais financiados, em uma área de mais de meio milhão de hectares no Brasil. Esses números configuram o valor aproximado médio de 283 mil reais por contrato, em uma área média de 100 hectares.

Observa-se pela Figura 25 que uma significativa parcela dos recursos voltados à recuperação de pastagens degradadas estão concentrados no centro-sul do Brasil, especialmente nas regiões centro-oeste e sudeste, enquanto que alguns “vazios” de cobertura são encontrados nas regiões norte e nordeste. Os estados de Minas Gerais, Goiás, Tocantins e São Paulo apresentaram as maiores quantidades de contratos concedidos para o subprograma RPD, com 19%, 18%, 12% e 8% de participação sobre o total de contratos, respectivamente. Quando observa-se o volume total de crédito concedido, em reais, as maiores participações são de Goiás (24%), Minas Gerais (13%), Mato Grosso (12%), Tocantins (11%), distribuição esta condizente com a área total contemplada nos contratos de RPD: Goiás (33%), Minas Gerais (12%), Tocantins (12%) e Mato Grosso (10%).

Figura 25. Distribuição de número de contratos, volume de crédito e área dos contratos do subprograma RPD no Brasil no período de janeiro de 2013 a abril de 2017.

Conforme apresenta a Figura 26 o estado de São Paulo, apesar de não concentrar as maiores áreas de pastagem no Brasil (de acordo com os dados do Lapig, 2016), está entre os estados com maior número de contratos RPD (8% do total); é o sexto em participação do volume total de crédito liberado para RPD (com 5% do total) e o quinto em quantidade de área total dos contratos RPD (4% do total).

Figura 26. Distribuição de número de contratos, volume de crédito e área dos contratos do subprograma RPD no estado de São Paulo no período de janeiro de 2013 a abril de 2017.

O subprograma Recuperação de Pastagem Degradada (RPD) possui diferentes modalidades, ou seja, finalidades específicas que podem ser financiadas pelo crédito. No banco de dados do SICOR utilizado neste estudo o subprograma RPD apresenta as seguintes modalidades: aquisição de animais, aquisição de animais de serviço, aquisição de veículos, formação de culturas perenes⁹, aquisição de máquinas, equipamentos e utensílios, melhoramento das explorações e outras modalidades.

Os histogramas apresentados nas Figuras 27 e 29 agregam as informações sobre número de contratos, volume de crédito e área contemplada nos contratos RPD. A primeira informação de cada ilustração é disposta na forma de colunas azuis, representando a contagem ou frequência absoluta de municípios para cada intervalo numérico do eixo X. A segunda informação é apresentada por uma linha vermelha que indica a frequência acumulada de municípios na progressão da esquerda para direita dos intervalos do eixo X.

Ao todo foram realizados 420 contratos no estado de São Paulo, os resultados da Figura 26 são para as variáveis número total de contratos, área (ha) e volume de crédito (R\$) dos financiamentos para o conjunto completo de modalidades inseridas no subprograma Recuperação de Pastagem

⁹ Considerado aqui como sinônimo de “formação de pastagens”.

Degradada (RPD). Verifica-se com a análise dos histogramas que aproximadamente 25 municípios, dos municípios em que o Programa ABC concedeu crédito via subprograma RPD no período de 01/2013 a 04/2017 tiveram somente 1 contrato executado, em termos percentuais esta informação representa cerca de 20% dos contratos realizados. 80% dos municípios tiveram até 4 contratos e apenas 1% dos municípios teve mais que 15 contratos executados.

Os histogramas da Figura 27 também apontam que pouco mais da metade dos municípios (51%, ou 64 municípios) contemplados pelo subprograma RPD executaram no período um total recursos de até R\$ 400 mil. Por outro lado, pouco mais de 15 municípios foram responsáveis por quase 24% do total executado.

E por fim, a análise do histograma de área por município no estado de São Paulo (Figura 27) mostra que aproximadamente 57% dos municípios tiveram menos de 110 ha de área financiada pelo subprograma RPD, enquanto menos de 2% dos municípios tiveram financiamentos em área igual ou superior a 770 hectares.

Figura 27. Número total de contratos, área (ha) e volume crédito (R\$) de concessão de financiamento para Recuperação de Pastagem Degradada (RPD) do Programa ABC por município no estado de São Paulo (01/2013 a 04/2017)

Como o objetivo deste estudo é analisar a eficiência do subprograma RPD em relação ao *yield gap* explorável das pastagens, considerou-se uma segunda análise apenas as modalidades formação de culturas perenes e melhoramento das explorações, juntamente, as quais entende-se que estão diretamente relacionadas ao processo de recuperação ou de melhorias das áreas de pasto. A Figura 28 apresenta a distribuição de número de contratos, volume de crédito e área dos contratos destinados a melhoramento das explorações e para formação de pastagem inseridos no subprograma RPD no estado de São Paulo.

Figura 28. Distribuição de número de contratos, volume de crédito e área dos contratos destinados a melhoramento das explorações e para formação de pastagem inseridos no subprograma RPD no estado de São Paulo para o período de janeiro de 2013 a abril de 2017.

Pelo banco de dados, 65% dos contratos RPD no estado são para as modalidades melhoramento das explorações e formação de pastagem (272 contratos), financiados por 82% dos recursos liberados, abrangendo 100% da área total do subprograma (20 mil hectares).

A Figura 28 mostra os resultados sobre os financiamentos apenas considerando as modalidades melhoramento das explorações e formação de pastagem inseridas no subprograma (RPD), quanto às variáveis número total de contratos, área (ha) e volume de crédito (R\$). Observa-se pelos histogramas que aproximadamente 40% dos municípios em que o Programa ABC concedeu recursos do subprograma

RPD nestas duas modalidades no período de 01/2013 a 04/2017 tiveram somente 1 contrato executado. Por sua vez, pouco mais de 85% dos municípios tiveram até 3 contratos e apenas 1% dos municípios teve mais de 7 contratos executados.

Os histogramas da Figura 29 também apontam que 50% dos municípios contemplados pelo subprograma RPD para as modalidades de melhoramento das explorações e formação de pastagem executaram no período um total recursos de até R\$ 400 mil. Por outro lado, pouco mais de 15 municípios, foram responsáveis por quase 24% do total executado.

Figura 29. Número total de contratos, área (ha) e volume crédito (R\$) de concessão de financiamento para Recuperação de Pastagem Degradada (RPD) para a finalidade Melhoramento das explorações + formação de pastagem por município no estado de São Paulo (01/2013 a 04/2017).

3.4.2 Eficiência na aplicação dos recursos RPD: uma análise utilizando o conceito de *yield gap*

Considerar a abordagem territorial na avaliação de políticas públicas para fins de planejamento e gestão possibilita um melhor direcionamento das ações que propõem progressos e soluções para questões imprescindíveis ao desenvolvimento rural sustentável (NEAD, 2015).

Entende-se que cada política pública a ser planejada e executada requer enfoques e direcionamentos específicos, e a formação dos grupos territoriais com padrões regionais bem definidos é considerada um importante elemento que possibilita orientar de forma mais consistente as tomadas de decisões dos gestores públicos, permitindo direcionar recursos e/ou ações para locais efetivamente relevantes e representativos.

De acordo com o Observatório ABC (2017), o governo federal ainda não adota uma definição explícita ou um método de priorização de áreas para direcionamento dos recursos do Programa ABC para recuperação de áreas degradadas (RPD). O principal elemento de priorização são as pastagens degradadas, estas identificadas com base em indicadores de produtividade da pecuária, principalmente o número de cabeças por hectare (ou unidade animal por hectare), como critério de seleção de áreas prioritárias (OBSERVATÓRIO ABC, 2017b). Por essa premissa, áreas com baixa lotação animal são consideradas degradadas. Entretanto, esta premissa nem sempre é verdadeira, pois há áreas com baixa capacidade de suporte, em função de limitações físicas, mas que não se encontram necessariamente degradadas.

A utilização de modelos biofísicos de crescimento de forragem é uma possível alternativa de abordagem à problemática, que pode auxiliar na identificação espacial de áreas onde a pecuária poderia se intensificar sem implicar em impactos ambientais, de modo a melhor direcionar políticas públicas que busquem estimular este processo, como o Programa ABC.

A fim de discutir sobre a efetividade de aplicação dos recursos do subprograma Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD) do Programa ABC, especialmente considerando as modalidades melhoramento das explorações e formação de pastagem, o modelo de grupos ou classes territoriais aqui abordados considerou que, territorialmente, as potencialidades biofísicas para o desenvolvimento das pastagens, bem como as condições reais de produção, são variáveis e que, portanto, alguns locais possuem maiores e outros menores condições de obter incrementos de produtividade através de um processo melhorias e recuperação dessas áreas.

A partir do cruzamento entre o mapa de distribuição de *yield gap explorável* (Yg) e o mapa de aplicação do crédito RPD foram geradas as classes territoriais, a saber: aplicação eficiente, aplicação insuficiente, aplicação suficiente e aplicação ineficiente (conforme apresentado no item 3.3.2 e na Figura 24).

O mapa apresentado pela Figura 30 mostra a distribuição espacial da aplicação do crédito RPD para as modalidades melhoramento das explorações + formação de pastagem, de modo que cada município onde houve concessão do recurso financeiro para essas modalidades foi classificado como

baixa ou alta aplicação de tais recursos, considerando o 50º percentil em termos de percentual de crédito concedido. Segundo o banco de dados do SICOR, houve a concessão do Suprograma RDP para estas modalidades em 125 municípios do estado de São Paulo, entretanto foram criadas classes de desempenho para 115 desses municípios (APÊNDICE B), por estes estarem inseridos em uma das quatro regiões consideradas neste estudo: Presidente Prudente, Catanduva, São Carlos e Votuporanga.

Figura 30. Distribuição espacial da aplicação do crédito RDP para as modalidades melhoramento das explorações + formação de pastagem no municípios que compõe as quatro regiões do estado de São Paulo: Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e Votuporanga.

Os municípios com os maiores percentuais de volume de crédito concedidos pelos contratos do RDP e classificados como “alta” aplicação são Rancharia (região de Presidente Prudente), Itatinga e Pradópolis (região de Catanduva) e Presidente Venceslau (região de Votuporanga). Por outro lado, os municípios com menores percentuais entre aqueles classificados como “baixa” aplicação são: Luércio (região de Catanduva) e Cafelândia e Martinópolis (região de Presidente Prudente).

Agregando os municípios conforme as suas respectivas regiões, ou seja, entre as quatro zonas climáticas homogêneas selecionadas no capítulo anterior, foi possível pela média de volume de crédito entre os municípios gerar um mapa de aplicação RDP para cada região considerando somente as categorias baixa ou alta para representar o nível de aplicação de recursos.

O Capítulo 2 deste estudo identificou a produtividade real e a produtividade atingível, adquirida pelas simulações no *CROPGRO perennial forage*, para a estimativa do *yield gap* explorável. A relação entre o *yield gap* explorável e a aplicação do recurso RDP para as quatro regiões de análise está ilustrada na Tabela 7 e Figura 31. Observa-se que com esta relação foi possível identificar 3 dos grupos ou classes

territoriais: G1 – aplicação eficiente, G2 – aplicação insuficiente e G4 – aplicação ineficiente. Logo, não surgiu região que pudesse ser classificada na classe G-3 aplicação suficiente, ou seja, com baixo Yg e baixa aplicação.

A região de Catanduva insere-se no Grupo 1 de desempenho em relação à aplicação do recurso RPD do Programa ABC. Ou seja, nota-se que nesta região há um elevado *yield gap* explorável com alta aplicação do recurso RPD, possibilitando um incremento de produtividade dos pastos e produção das forragens ($\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$). Portanto, a região permite uma maior aplicação de recursos e ela realmente aconteceu.

A região de São Carlos enquadra-se no Grupo 2 de desempenho quanto à aplicação do crédito para RPD. Na região, portanto, se observa um elevado *yield gap* explorável, com boa oportunidade de incrementar a produtividade dos pastos e aumentar a produção de forragem ($\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$), porém houve baixa aplicação dos recursos RPD. Logo, apesar de existir na região uma significativa lacuna de produtividade, os recursos disponíveis foram aplicados de forma insuficiente. Esta situação, portanto, indica que parte do direcionamento do Programa ABC não está bem ajustada, e que o ajuste entre potencial de melhoria de produtividade e oferta de recursos pode criar um cenário mais favorável ao desempenho da pecuária nessa região.

Já as regiões de Presidente Prudente e Votuporanga, em relação ao desempenho na aplicação do crédito para RPD, inserem-se no Grupo 4. Em ambas as regiões é possível notar uma alta aplicação de recursos RPD em áreas de baixo *yield gap* explorável. Portanto, há pequena oportunidade de incrementar a produtividade ou aumentar a produção dos pastos, com aporte de recursos acima do necessário. Dadas essas condições, as regiões indicam pouco potencial para direcionar recursos RPD pelo Programa ABC.

Tabela 7. Grupos de desempenho na aplicação dos recursos do Programa ABC para o subprograma Recuperação de Pastagem Degradada (RPD) para quatro regiões do estado de São Paulo

Região	Yg level	Aplicação	Classe territorial
Presidente Prudente	baixo	alta	G4_aplicação ineficiente
Catanduva	alto	alta	G1_Aplicação eficiente
São Carlos	alto	baixa	G2_aplicação insuficiente
Votuporanga	baixo	alta	G4_aplicação ineficiente

Figura 31. Resultado espacial dos grupos ou classes territoriais de desempenho na aplicação dos recursos para recuperação de pastagem degradada com base no *yield gap* explorável em quatro regiões do estado de São Paulo: Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e Votuporanga.

Os resultados para as quatro regiões do estado de São Paulo, que representam aproximadamente 76% de toda área de pastagem do estado, apontam que uma melhor compreensão da sobre a áreas de maior ou menor *yield gap* explorável pode auxiliar as decisões tomadas pelos gestores do Programa ABC, com maior possibilidade de assertividade.

A mesma relação entre o *yield gap* explorável e a aplicação do recurso RDP foi posteriormente efetuada em escala municipal, considerando os 115 municípios que compõe as quatro regiões acima analisadas. A Figura 32 mostra a distribuição espacial de tais municípios de acordo com sua classe territorial de desempenho na aplicação desses recursos. Observa-se que: (i) 31 dos municípios inserem-se no Grupo 1, onde a aplicação do recurso RDP é eficiente; (ii) 26 municípios enquadram-se no Grupo 2, isto é, recebem aplicação insuficiente do recurso; (iii) 31 municípios estão no Grupo 3, apresentando aplicação suficiente e (iv) 27 inserem-se no Grupo 4, em que a aplicação é ineficiente (ver lista de municípios no APENDICE B).

Figura 32. Resultado espacial dos grupos ou classes territoriais de desempenho na aplicação dos recursos para recuperação de pastagem degradada com base no *yield gap* explorável dos municípios inseridos nas quatro regiões analisadas do estado de São Paulo: Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e Votuporanga.

Com tais resultados, buscou-se, portanto, apresentar uma abordagem territorial aliada a modelagem mecanística, como instrumento de planejamento de uma política pública, em especial o Programa ABC, de modo a possibilitar: (i) ampliar os recursos do Programa ABC para regiões onde poderá ter maior impacto; e (ii) oferecer os elementos para o direcionamento dos instrumentos e políticas disponíveis visando a ampliação da capacidade de dinamização econômica do setor agropecuário e dos territórios de modo geral.

3.5 Considerações finais

O presente capítulo buscou discutir sobre a efetividade de aplicação dos recursos do subprograma Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD) do Programa ABC com base no conceito de *yield gap* explorável estimado através do modelo mecanístico *CROPGRO Perennial Forage*. Para tanto, o estudo adota uma abordagem alternativa ao conceito de pastagem degradada, atualmente muito atrelado à baixa lotação animal (UA.ha⁻¹).

Para tanto, o modelo de grupos ou classes territoriais aqui abordados considera que, territorialmente, as potencialidades biofísicas para o desenvolvimento das pastagens, bem como as condições reais de produção, são variáveis e que, portanto, alguns locais possuem maiores e outros

menores condições de obter incrementos de produtividade através de um processo melhorias e recuperação dessas áreas.

Os resultados para as quatro regiões do estado de São Paulo, que representam aproximadamente 76% de toda área de pastagem do estado, indicam que é possível verificar três das quatro classes territoriais de desempenho na aplicação do recurso RPD: Grupo 1 - região de Catanduva em que os recursos foram direcionados eficientemente por apresentar áreas de elevados valores de Yg e um alto volume do crédito; Grupo 2 - região de São Carlos onde os recursos RPD são aplicados de forma insuficiente, pois há um elevado *yield gap* explorável que possibilitaria incrementar a produtividade dos pastos, entretanto, observa-se baixa aplicação do crédito; e Grupo 4 - regiões de Presidente Prudente e Votuporanga onde a aplicação do crédito ocorreu de maneira ineficiente, isto é, são regiões com alta aplicação de crédito, entretanto, há uma baixa oportunidade de incrementar a produtividade por apresentar baixos valores de Yg.

A mesma relação entre o *yield gap* explorável e a aplicação do recurso RPD foi efetuada para escala municipal, considerando os 115 municípios que compõe as quatro regiões analisadas e com isso, de modo geral, os resultados apontam que uma melhor compreensão da sobre a áreas de maior ou menor *yield gap* explorável pode auxiliar as decisões tomadas pelos gestores do Programa ABC, com maior possibilidade de assertividade, podendo fazer parte, daqui para a frente, de uma estratégia diferenciada da utilização dos recursos RPD disponíveis.

A importância deste estudo está em mostrar que a utilização de modelos de culturas pode ser eficaz uma promissora ferramenta para definição de *yield gap* e que pode melhor direcionar tomadores de decisão quanto a políticas e medidas voltadas à intensificação sustentável da pecuária.

REFERÊNCIAS

BACEN, B. C. do B. **Crédito Rural: Programa para Redução da Emissão de Gases de Efeito Estufa na Agricultura (Programa ABC).**

BARRETTO, A. G. O. P.; BERNDES, G.; SPAROVEK, G.; WIRSENIUS, S. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: An analysis of the 1975-2006 period. **Global Change Biology**, v. 19, n. 6, p. 1804–1815, 2013.

BRASIL, M. da A. P. e A. Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para Consolidação da Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – PLANO ABC. **MAPA**, v. 4, n. 6, p. 1266–1274, 2012.

DIAS-FILHO, M. B. Degradação de pastagens : processos, causas e estratégias de recuperação, 2011.

MARIN, F. R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos.** 2014.

- NEAD, Núcleo de Estudos Agrários e Desenvolvimento Rural. **Análise e Planejamento Territorial - Projeções e Estratégias para a Agricultura Familiar Brasileira**. (Nead/MDA). Brasília, 2015.
- PRETTY, J.; BHARUCHA, Z. P. Sustainable intensification in agricultural systems. **Annals of Botany**, v. 114, n. 8, p. 1571–1596, 2014.
- NEWTON, P.; AGRAWAL, A.; WOLLENBERG, L. Enhancing the sustainability of commodity supply chains in tropical forest and agricultural landscapes. **Global Environmental Change**, v. 23, n. 6, p. 1761–1772, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.08.004>>.
- OBSERVATÓRIO ABC. Impactos econômicos e ambientais do Plano ABC. p. 1–28, 2017a. Disponível em: <http://observatorioabc.com.br/wp-content/uploads/2017/09/Sumario_ABC_Relatorio5_GRAFICA-2.pdf>.
- OBSERVATÓRIO ABC. Avaliação do uso estratégico das áreas prioritárias do Programa ABC. p. 18, 2017b.
- PRETTY, J.; BHARUCHA, Z. P. Sustainable intensification in agricultural systems. **Annals of Botany**, v. 114, n. 8, p. 1571–1596, 2014.
- ROYAL SOCIETY. **Reaping the benefits**. [s.l.: s.n.]
- SÃO PAULO, S. de A. e A. de. **O Plano ABC é realidade em São Paulo**. [s.l.: s.n.].
- SPAROVEK, G.; ARAUJO, M.A.; RANIERI, S.B.L. **As pastagens e a agenda ambiental**. In: 28o Simpósio sobre Manejo da Pastagem, Piracicaba. Anais. Piracicaba: FEALQ, 2017.
- SPAROVEK, G.; BARRETTO, A. G. D. O. P.; MATSUMOTO, M.; BERNDDES, G. Effects of Governance on Availability of Land for Agriculture and Conservation in Brazil. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 17, p. 10285–10293, 2015.
- STRASSBURG, B. B. N.; LATAWIEC, A. E.; BARIONI, L. G.; NOBRE, C. A.; DA SILVA, V. P.; VALENTIM, J. F.; VIANNA, M.; ASSAD, E. D. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, n. 1, p. 84–97, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001>>.
- VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>>.
- WEST, P. C.; GIBBS, H. K.; MONFREDA, C.; WAGNER, J.; BARFORD, C. C.; CARPENTER, S. R.; FOLEY, J. A. Trading carbon for food: Global comparison of carbon stocks vs. crop yields on agricultural land. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 46, p. 19645–19648, 2010. Disponível em: <<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1011078107>>.

4. CONCLUSÃO GERAL

O modelo *CROPGRO Perennial Forage* se mostrou capaz de realizar simulações de longo prazo e permitir uma boa estimativa de valores de produtividade atingível e potencial das pastagens. Para minimizar as incertezas associados a modelagem mecanística é recomendável que experimentos de campo sejam efetuados para diferentes regiões para calibração e validação de desempenho. Além disso, o uso de multimodelos é um importante recurso na redução de incertezas.

Entre os principais resultados observados no trabalho estão: i) o estado de São Paulo apresenta potencial para incremento de produtividade em um processo de intensificação sustentável da pecuária, uma vez que a eficiência média atual da produção de pastagens e o *yield gap* médio explorável (Y_g) no estado foram de 46,4% e 5,8 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente; ii) a eficiência de aplicação do recurso RPD do Programa ABC ocorre de maneira heterogênea no estado, ou seja, há locais com aplicação eficiente onde um maior volume de recurso foi direcionado para regiões de elevados valores de Y_g (Catanduva), outros em que uma alta aplicação do crédito ocorreu de maneira ineficiente por apresentar uma baixa oportunidade de incrementar a produtividade (baixo Y_g) (Presidente Prudente e Votuporanga), e ainda locais em que os recursos RPD são aplicados de forma insuficiente, devido a região possuir elevado *yield gap* explorável e ter apresentado baixa aplicação do crédito RPD (São Carlos).

A identificação das áreas com maiores *yield gaps* pode, portanto, direcionar com maior assertividade políticas públicas e investimentos voltados à pecuária, especialmente bovinocultura de corte, a exemplo do Programa ABC. O conceito de eficiência produtiva e *yield gap* é visto, então, como promissor para subsidiar caminhos que diminuam o impacto ambiental das pastagens, como emissão de GEE, e abram espaço para a expansão da produção agrícola sem novos desmatamentos.

Políticas públicas bem planejadas são fundamentais na agenda de intensificação do setor pecuário, porém, não obstante da discussão aqui proposta é também importante a reflexão sobre os seguintes pontos envolvendo este processo: i) economicamente, há incertezas de que se aumentar a produtividade, consolidando o setor num patamar de maior competitividade, ele possa efetivamente reduzir sua área; ii) fisicamente, as áreas com maior potencial (em termos de clima, solo, relevo, etc.) para este processo, podem, eventualmente, coincidir territorialmente com as áreas de maior aptidão para expansão de demais culturas agrícolas; e iii) ambientalmente, na agenda da intensificação da pecuária e substituição de pastos por lavouras – com possível ganho ambiental – a alocação das lavouras se daria justamente em áreas de menor aptidão agrícola, isto é, onde a capacidade de intensificação é menor devido a climas mais restritivos ou solos mais pobres. Logo, o processo de intensificação é um fenômeno complexo e dinâmico e demanda pelo desenvolvimento de pesquisas e por um bom planejamento territorial, que pode ser potencializado com o uso de modelos de culturas como instrumentos de avaliação e proposição de políticas ligas ao tema

APÊNDICES

APÊNDICE A. Distribuição espacial da taxa de lotação (UA/ha) das pastagens no estado de São Paulo com base nos dados de rebanho bovino entre 2007 a 2016, gerados a partir do Levantamento Municipal da Pecuária (PPM – IBGE).

APÊNDICE B. Classe territorial dos municípios que compõem as quatro regiões do estado de São Paulo onde ocorreu concessão do recurso RPD pelo Programa ABC

<i>Código_município_IBGE</i>	<i>Nome_Município</i>	<i>Código_Zona Climática</i>	<i>Classe territorial</i>
3527108	Lins	7051	G4
3519006	Herculândia	7051	G3
3503356	Arco-Íris	7051	G4
3539202	Pirapozinho	7051	G4
3542008	Quintana	7051	G4
3541703	Quatá	7051	G3
3541109	Presidente Alves	7051	G4
3508801	Cafelândia	7051	G3
3538907	Pirajuí	7051	G4
3527702	Luiziânia	7051	G3
3507704	Braúna	7051	G4
3527900	Lutécia	7051	G3
3541406	Presidente Prudente	7051	G4
3507407	Borborema	7051	G3
3529203	Martinópolis	7051	G3
3543808	Rinópolis	7051	G3
3519204	Iacri	7051	G4
3534500	Oscar Bressane	7051	G4
3547700	Santo Anastácio	7051	G3
3507209	Borá	7051	G3
3529005	Marília	7051	G3
3555000	Tupã	7051	G3
3505807	Bastos	7051	G3
3519600	Ibitinga	7051	G2
3542206	Rancharia	7051	G1
3540002	Pompéia	7051	G2
3540853	Pracinha	7051	G1
3544251	Rosana	7051	G1
3536000	Parapuã	7051	G1
3515350	Euclides da Cunha Paulista	7051	G1
3530201	Mirante do Paranapanema	7051	G1
3528700	Marabá Paulista	7051	G1
3506003	Bauru	7051	G1
3539400	Piratininga	7051	G1
3554300	Teodoro Sampaio	7051	G1
3504305	Avaí	7051	G1
3528809	Maracaí	7061	G4
3553005	Taguaí	7061	G4
3556602	Vera Cruz	7061	G4
3515400	Fartura	7061	G4
3501400	Álvaro de Carvalho	7061	G4
3502200	Angatuba	7061	G4
3506102	Bebedouro	7061	G4
3514700	Echaporã	7061	G4
3526704	Leme	7061	G4
3554607	Timburi	7061	G3
3538808	Piraju	7061	G2
3516705	Garça	7061	G2
3540903	Pradópolis	7061	G1
3527801	Lupércio	7061	G2
3514502	Duartina	7061	G2
3514106	Dois Córregos	7061	G1
3523503	Itatinga	7061	G1
3522703	Itápolis	7061	G2
3528601	Manduri	7061	G2
3550407	São Pedro	7061	G1
3550506	São Pedro do Turvo	7061	G1

<i>Código_município_IBGE</i>	<i>Nome_Município</i>	<i>Código_Zona Climática</i>	<i>Classe territorial</i>
3508306	Cabrália Paulista	7061	G1
3537503	Pereiras	7061	G1
3521804	Itaí	7061	G2
3547007	Santa Maria da Serra	7061	G1
3554201	Tejupá	7061	G2
3527504	Lucianópolis	7061	G1
3555505	Ubirajara	7061	G2
3504503	Avaré	7061	G1
3508009	Buri	7061	G1
3530508	Mococa	7071	G1
3505906	Batatais	7071	G2
3531902	Morro Agudo	7071	G2
3501004	Altinópolis	7071	G1
3512704	Corumbataí	7071	G2
3508702	Caconde	7071	G1
3554706	Torrinha	7071	G2
3550803	São Sebastião da Gramma	7071	G2
3550902	São Simão	7071	G2
3536307	Patrocínio Paulista	7071	G2
3507902	Brotas	7071	G2
3525706	José Bonifácio	8051	G4
3508108	Buritama	8051	G4
3544608	Sabino	8051	G4
3540804	Potirendaba	8051	G3
3537404	Pereira Barreto	8051	G3
3555208	Turiúba	8051	G3
3540259	Pontalinda	8051	G3
3533304	Nova Luzitânia	8051	G3
3541604	Promissão	8051	G3
3518206	Guararapes	8051	G4
3552551	Suzanópolis	8051	G4
3516903	General Salgado	8051	G3
3512100	Colômbia	8051	G4
3532603	Nhandeara	8051	G4
3552304	Sud Mennucci	8051	G4
3533205	Nova Independência	8051	G3
3518909	Guzolândia	8051	G3
3534807	Ouro Verde	8051	G3
3511003	Castilho	8051	G3
3532108	Murutinga do Sul	8051	G3
3530102	Mirandópolis	8051	G3
3553401	Tanabi	8051	G3
3548054	Santo Antônio do Aracanguá	8051	G3
3529104	Marinópolis	8051	G3
3555109	Tupi Paulista	8051	G3
3535200	Palmeira d'Oeste	8051	G2
3518008	Guarani d'Oeste	8051	G2
3515806	Flora Rica	8051	G1
3510708	Cardoso	8051	G1
3557105	Votuporanga	8051	G2
3536901	Pedranópolis	8051	G2
3533007	Nova Granada	8051	G2
3535408	Panorama	8051	G1
3541307	Presidente Epitácio	8051	G1
3538303	Piquerobi	8051	G1
3535002	Palestina	8051	G2
3541505	Presidente Venceslau	8051	G1
3519808	Icém	8051	G2