



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS (UFT)  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROENERGIA (PPGA)

**ANDRÉ DE MOURA ANDRADE**

**ANÁLISE PROSPECTIVA DO SISTEMA PRODUTIVO DA SOJA NO ESTADO DO  
TOCANTINS, CONSIDERANDO CENÁRIOS DE RISCOS HÍDRICOS E  
CLIMATOLÓGICOS**

PALMAS/TO

2020

**ANDRÉ DE MOURA ANDRADE**

**ANÁLISE PROSPECTIVA DO SISTEMA PRODUTIVO DA SOJA NO ESTADO DO  
TOCANTINS, CONSIDERANDO CENÁRIOS DE RISCOS HÍDRICOS E  
CLIMATOLÓGICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agroenergia. Foi avaliada para obtenção do título de Mestre em Agroenergia e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Erich Collicchio.

PALMAS/TO

2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

A553a Andrade, André de Moura.

Análise prospectiva do sistema produtivo da soja no Estado do Tocantins, considerando cenários de riscos hídricos e climatológicos. / André de Moura Andrade. – Palmas, TO, 2020.

116 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Agroenergia, 2020.

Orientador: Erich Collicchio

1. Funções de pedotransferência. 2. Simulações de riscos climáticos. 3. Modelam de dinâmica territorial. 4. Unidades de Conservação. I. Título

**CDD 333.7**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

# FOLHA DE APROVAÇÃO

ANDRÉ DE MOURA ANDRADE

## TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO:

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia. Foi avaliada para obtenção do título de Mestre em Agroenergia e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 18/09/2020

Banca Examinadora



---

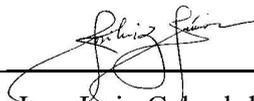
Prof. Dr. Erich Collicchio, UFT



Documento assinado digitalmente  
JOENES MUCCI PELUZIO  
Data: 21/10/2022 13:17:34-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Joênes Mucci Peluzio, UFT



---

Prof. Dr. Jose Luiz Cabral da Silva Júnior, UNITINS

PALMAS, TO  
2020

*Aos meus pais*

*O infinitamente pequeno e o infinitamente grande são arquitetos do mundo natural.*  
(Carl Sagan)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus e aos meus pais por cuidarem com muito afeto do meu caminhar desajeitado. A trajetória demanda às vezes de soluções aparentemente complexas, as quais são proporcionadas diariamente pela minha família em simplicidade e força que são intransponíveis em palavras.

Ao meu orientador, Erich Collicchio, devo igualmente incomparável honra. As qualidades que cercam este nome sob minha perspectiva extrapolariam qualquer tentativa de descrevê-las, ou delinear-las em um modelo. As variáveis certamente seriam muitas, sua compaixão, sua compreensão, sua amizade, seu intelecto e dentre outras centenas que transpassam a alma de um verdadeiro cristão. Sou grato por seus ensinamentos que vão muito além da climatologia, da modelagem, do planejamento e da filosofia ambiental. Sou grato pelo seu entendimento exemplar sobre a vida.

À minha banca de avaliação também escrevo meus agradecimentos. Ao professor José Luiz Cabral sobre o qual mantenho sincera admiração e respeito no presente e em trabalhos anteriores. Minha gratidão certamente também não deveria deixar à parte Joênes Mucci Pelúzio, cujo brilhantismo e contribuição científica serve de verdadeira inspiração.

Cordialmente exponho meus agradecimentos também aos colegas do Laboratório de Agroenergia, Uso da Terra e Mudanças Ambientais (LAMAM). Em especial, a Rodrigo Barbosa Sellos Lopes e Fabio Gamba, cujos trabalhos e convívio igualmente serviram de inspiração para o desenvolvimento deste estudo. O mesmo se estende a todos os envolvidos no Programa de Pós-Graduação em Agroenergia (PPGA) que indubitavelmente oportunizaram a minha melhor experiência acadêmica.

## RESUMO

A soja é uma das principais culturas comerciais do país, sendo que ao mesmo tempo tem influenciado na mudança do uso do solo, de forma significativa no desmatamento do Cerrado brasileiro. Destaca-se que sua demanda é parametrizada exponencialmente por várias aplicações, cosméticas, alimentícias e de geração de biocombustíveis, e que se dispõe como a maior causa das transformações territoriais no Brasil. O Tocantins se encontra no rol das unidades federativas cuja matriz econômica é dominada pelo agronegócio especialmente pela cadeia produtiva desta oleaginosa. Face à flexibilização das legislações estaduais e federais no tratamento de algumas Unidades de Conservação inseridas no limite estadual tocantinense, este trabalho tem o intuito de prospectar o avanço da soja no entorno e nos interiores destas áreas protegidas, bem como de sua dinâmica a partir de cenários de riscos climáticos para o desempenho desta planta, que é altamente correlacionável ao estresse hídrico. Assim sendo construiu-se uma função de pedotransferência para estimativa da Capacidade de Água Disponível (CAD) no Estado com amostras granulométricas da Embrapa. Esta variável foi considerada de entrada para a simulação de cálculo de balanço hídrico de 36 datas de semeadura da leguminosa para determinação de seu Índice de Satisfação de Necessidade de Água (ISNA) por data de plantio para 130 coordenadas de estações pluviométricas. Outras simulações foram geradas para outros dois zoneamentos de riscos climáticos da cultura em escrutínio, utilizando-se de precipitações e temperaturas médias decenais simuladas entre 2021 e 2050. Cada zoneamento construído pertence a uma constante de reflexão da radiação atmosférica em razão da concentração de gases de efeito estufa do modelo de circulação global MIROC5, RCP 4.5  $W/m^2$  e 8.5  $W/m^2$ . Estes dois caminhos representativos do clima foram inseridos como variáveis estáticas em um modelo de usos e ocupações (LUCC - land-use and land-cover change) do Dinamica EGO, que foi calibrado quanto aos pesos das probabilidades de transição e validado pelo método de Hagen (2003). Dados do inventário florestal do Estado do Tocantins realizado pela Secretaria de Planejamento (Seplan) do governo estadual permitiram a quantificação de dióxido de carbono equivalente ( $CO_2e$ ) resultante da transição das áreas de vegetação natural em sistema produtivo da soja e o grau de desmatamento em UCs e em suas zonas de amortecimento. Em ambos os cenários, a APA da Ilha do Bananal/Cantão foi mais prejudicada pela pressão dos investimentos agrícolas. A mesma possuiu pelo menos uma data de plantio de baixo risco à deficiência hídrica, ISNA na fase fenológica de florescimento a enchimento dos grãos acima de 0,65, sendo destaque por se figurar com baixa vulnerabilidade climática entre os anos de 2021 e 2050, nas duas projeções realizadas. Estes modelos espaço temporais também identificaram fugas de investimento nos maiores produtores municipais, Campos Lindos e Mateiros, pois estes posicionam-se geograficamente em áreas de alta frequência de ISNAs abaixo de 0,55, tanto na visão tendencial quanto na pessimista em relação ao tratamento das políticas de mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** risco climático; modelagem; sojicultura; uso da terra; mudança do clima.

## ABSTRACT

Soy is one of the main commercial crops in the country, and at the same time it has influenced the change in land use, significantly in the deforestation of the Brazilian Cerrado. It is noteworthy that its demand is parameterized exponentially for various applications, cosmetics, food and biofuel generation, and that it is available as the major cause of territorial transformations in Brazil. Tocantins is on the list of federative units whose economic matrix is dominated by agribusiness, especially by the production chain of this oilseed. In view of the flexibility of state and federal laws in the treatment of some Conservation Units inserted in the Tocantins state limit, this work aims to prospect the advance of soy in the surroundings and in the interiors of these protected areas, as well as its dynamics from scenarios of climatic risks to the performance of this plant, which is highly correlated to water stress. Thus, a pedotransfer function was constructed to estimate the Available Water Capacity (AWC) in the State with Embrapa granulometric samples. This variable was considered an input for the water balance calculation simulation of 36 legume sowing dates to determine its Water Need Satisfaction Index (WNSI) by planting date. Other simulations were generated for two other climatic risk zonings of the crop under scrutiny, using simulated rainfall and average temperature averages simulated and corrected with observational data between 2021 and 2050 for 130 coordinates of pluviometric stations. Each zoning built belongs to a constant reflection of atmospheric radiation due to the concentration of greenhouse gases in the global circulation model MIROC5, RCP 4.5 W / m<sup>2</sup> and 8.5 W / m<sup>2</sup>. These two paths representative of the climate were inserted as static variables in a model of uses and occupations (LUCC - land-use and land-cover change) of Dinamica EGO, which was calibrated for the weights of the transition probabilities and validated by the Hagen method (2003). Data from the State's forest inventory carried out by the State Government's Planning Secretariat (Seplan) allowed the quantification of carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>e) resulting from the transition from areas of natural vegetation to a soybean production system and the degree of deforestation in UCs and in their buffer zones. In both scenarios, the Bananal/Cantão Island was the most affected by the pressure from agricultural investments. It had at least one planting date of low risk to water deficiency, WNSI in the phenological phase of flowering and filling of grains above 0.65, being highlighted for being with low climatic vulnerability between the years 2021 and 2050, in the two projections made. These temporal space models also identified investment leakages in the largest municipal producers, Campos Lindos and Mateiros, as they are geographically positioned in high frequency areas of WNSI below 0.55, both in the trend view and in the pessimistic view regarding the treatment of climate change policies.

**Keywords:** climatic risk; modeling; soybean producer; land use; climate change.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma das etapas metodológicas.....	15
Figura 2 – Produção de soja (em mil t) nas macrorregiões no período de 2004 a 2019 .....	21
Figura 3 – Produção de soja (em mil t) nos estados pertencentes do Matopiba, entre os anos safras de 2004/2005 a 2019/2020 .....	21
Figura 4 – Evolução da área plantada de soja (ha) nas microrregiões do Tocantins, no período de 2004 a 2017.....	22
Figura 5–Mapa de Carbono Orgânico no Solo - COS ( $t \cdot ha^{-1}$ ) da Embrapa (2017) (a) e da soma de bases (em %) utilizando a função de pedotransferência - FPT de Schiavo et al. (2011), adaptado pelo autor (b) por microrregião no Estado do Tocantins .....	27
Figura 6 – Principais Unidades de Conservação (a) e microrregiões (b) .....	47
Figura 7 – Fluxograma da metodologia adotada para obtenção do mapa da CAD no Estado do Tocantins .....	48
Figura 8 – Amostras granulométricas nos Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia do Sistema de Informação de Solos Brasileiros da Embrapa .....	50
Figura 9 – Triângulos texturais das 157 amostras coletadas pela Embrapa (a) e do gradiente de água disponível no solo do Matopiba (b) .....	53
Figura 10 – Correlação entre os dados de DTA observados pela rotina algorítmica do Qualisolo e os estimados pela função de pedotransferência em mm/cm de solo em 157 amostras da Embrapa no Matopiba .....	54
Figura 11 – Mapa e histograma da distribuição dos valores de Capacidade de Água Disponível (em mm), para a cultura da soja nas microrregiões do Estado do Tocantins .....	55
Figura 12 - Principais Unidades de Conservação (a) e microrregiões (b).....	71
Figura 13 – Fluxograma da metodologia adotada para obtenção dos Índices de Satisfação da Necessidade de Água (ISNA) para diferentes cenários de riscos climáticos .....	72
Figura 14 - Estações pluviométricas da ANA e meteorológicas do INMET .....	74
Figura 15 - Risco climático das nove datas de semeadura da cultura da soja (GMR=média) que representam os decêndios dos meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro.....	78
Figura 16 - Comparação entre as áreas de baixo, médio e alto risco climático para as séries históricas de chuva e temperatura observadas entre 1986 e 2017 (a), e estimadas pelo modelo MIROC5 entre os anos de 2021 a 2050, para os cenários RCP 4.5 (b) e RCP 8.5 (c).....	81
Figura 17 - Principais Unidades de Conservação (a) e microrregiões (b).....	92
Figura 18 - Fluxograma da metodologia adotada para obtenção dos mapas de expansão da soja segundo os cenários de riscos climáticos .....	93
Figura 19 – Índices de similaridade Fuzzy entre os mapas de diferenças simuladas e observadas para diferentes tamanhos de janelas e cenários de expansão da soja no Estado do Tocantins.....	97
Figura 20 - Emissões acumuladas de CO <sub>2</sub> e por cenário climático e área desmatada acumulada entre 2009 e 2050 .....	98
Figura 21 – Estimativa da cultura da soja no Tocantins para o cenário RCP 4.5 no ano de 2020 (a) e 2050 (b) e para o RCP 8.5 no ano de 2020 (c) e 2050 (d) do modelo MIROC5.....	99

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Equações que relacionam a soma de bases com o carbono orgânico do solo e suas respectivas validações estatísticas .....	26
Quadro 2 - Unidades de Conservação localizadas no Estado do Tocantins, com maior percentual em área.....	35
Tabela 1 – Análise de variância das 157 amostras disponibilizadas pela Embrapa na região do Matopiba.....	53
Tabela 2 – Estatística descritiva das funções de pedotransferência encontradas para o Matopiba que relacionam a Disponibilidade Total de Água (DTA) às variáveis explicativas de concentração de Areia Total (AT), Argila (AG), Silte (ST) e Carbono Orgânico (CO).....	54
Tabela 3 – Coeficientes da cultura (Kc) estabelecidos por decêndios durante o ciclo da cultura da soja.....	75

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AD - Água disponível

Conab – Companhia Nacional de Abastecimento

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FPT – Função de Pedotransferência

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PAM – Produção Agrícola Municipal

UC – Unidade de Conservação

ZARC- Zoneamento Agrícola de Risco Climático

## SUMÁRIO

ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	15
1 - INTRODUÇÃO .....	16
2 - OBJETIVOS .....	19
2.1 - Objetivo geral.....	19
2.2 - Objetivos específicos.....	19
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
3.1 - Cultivo da soja no Estado do Tocantins .....	20
3.2 - Curvas de retenção de água nos solos .....	22
3.3 - Funções de pedotransferência (FPT) aplicadas em solos do cerrado do Tocantins .....	24
3.4 - Aspectos edafoclimáticos da soja.....	28
3.5 - A retenção de água e a regulação de nitrogênio para a sojicultura .....	31
3.6 - Estudos de aplicação com Dinâmica EGO.....	32
3.7 - O cultivo da soja e as Unidades de Conservação no Tocantins .....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	37
4 - ESPACIALIZAÇÃO DA CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL NO ESTADO DO TOCANTINS POR MEIO DE EQUAÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA.....	43
4.1 - Introdução.....	44
4.2 - Material e métodos .....	46
4.3 - Resultados e Discussão .....	52
4.4 - Conclusões .....	61
Referências Bibliográficas.....	62
5 - CENÁRIOS DE RISCOS CLIMÁTICOS PARA A PRODUÇÃO DA SOJA E SUA RELAÇÃO COM AS UNIDADES DE CONSERVAÇÃO NO ESTADO DO TOCANTINS.....	67
5.1 - Introdução.....	68
5.2 - Material e métodos .....	70
5.3 - Resultados e Discussão .....	77
5.4 - Conclusões .....	84
Referências Bibliográficas.....	85
6 - MODELAGEM DE DINÂMICA TERRITORIAL DA SOJA NO ESTADO DO TOCANTINS E EM SUAS UCs A PARTIR DE CENÁRIOS DE RISCOS CLIMÁTICOS .....	89

6.1 - Introdução.....	90
6.2 - Material e métodos .....	92
6.3 - Resultados e Discussão .....	96
6.4 - Conclusões .....	105
Referências Bibliográficas.....	107
7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
APÊNDICES .....	112

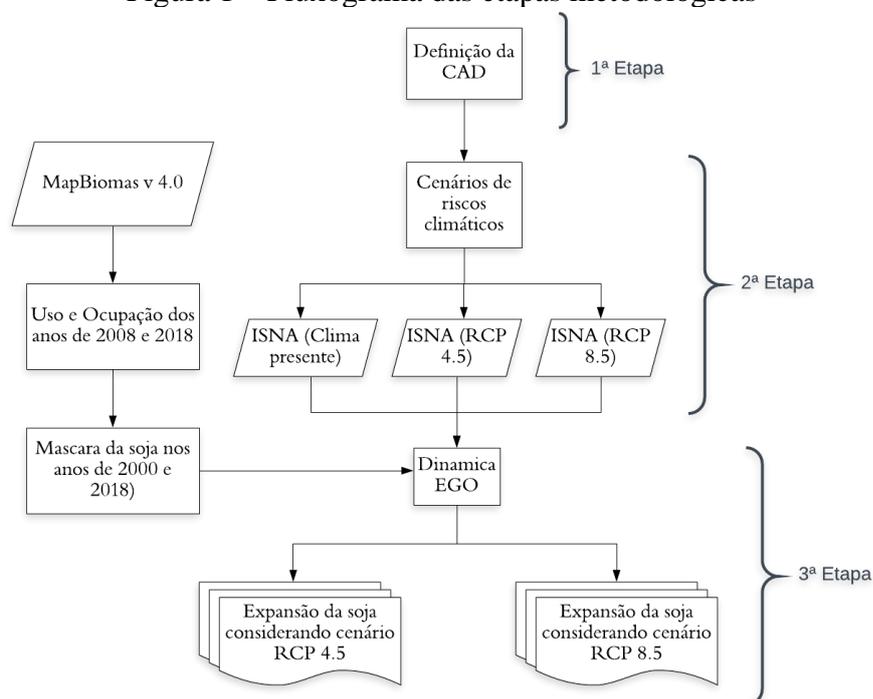
## ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho foi estruturado em sete itens, conforme a seguir: 1 – Introdução (geral); 2 – Objetivos; 3- Fundamentação Teórica (geral); 4 – Artigo 1; 5 – Artigo 2; 6 – Artigo 3 e 7 – Considerações Finais (gerais).

Com relação ao núcleo central do trabalho que refere-se aos artigos, foi dividido em três etapas básicas: 1) Determinação da capacidade de água disponível (CAD) para a soja; 2) Projeção de cenários de riscos climáticos para o cultivo da soja; e 3) Análise prospectiva do avanço da fronteira da soja em regiões do entorno das Unidades de Conservação (UCs) do Estado do Tocantins, Figura 1.

O fluxograma da Figura 1 mostra as relações entre os métodos abordados por este desenvolvimento. A determinação da CAD para o Estado do Tocantins por intermédio de uma função de pedotransferência foi o produto da primeira etapa metodológica aproveitada para a elaboração dos cenários de riscos climáticos derivados das simulações de balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) conforme pormenorizado metodologicamente adiante. Estes caminhos representativos dos Índices de Satisfação das Necessidades da Água (ISNA) servirão para calibração dos modelos de dinâmica de uso e cobertura para delineamento dos prováveis avanços da soja nas Unidades de Conservação do Estado do Tocantins e em suas respectivas zonas de amortecimento.

Figura 1 – Fluxograma das etapas metodológicas



## 1 - INTRODUÇÃO

A logística do sistema produtivo da soja no país ampliou significativamente em razão do acréscimo de demandas por biocombustíveis e para o processamento da indústria alimentícia. Estimou-se pelo Balanço Energético Anual que no Brasil, em 2018, cerca de 11% do Diesel Total foi derivado de oleaginosas. Em 2007 esse valor era de 1%, o que pode ilustrar sua tendência de aceitabilidade mercadológica (EPE, 2019).

Este aspecto exige das políticas governamentais um ordenamento territorial para que o crescimento desta oleaginosa em particular não atinja demasiadamente áreas de alto valor ambiental. A predição do avanço dessas fronteiras agrícolas no entorno e no interior das Unidades de Conservação e de preservação de espécies podem configurar perdas financeiras e ambientais (SANTOS; RIBEIRO, 2017), passíveis de valoração a longo prazo, acaso estas demarcações legais não sejam respeitadas. Além disso, pode estimular a criação de novas restrições políticas de desenvolvimento dada às taxas de desmatamento estimadas neste território, bem como refletir negativamente na comercialização de grãos ou de biocombustíveis.

Aguiar (2016) demonstra um alto impacto da cultura da soja no Estado do Tocantins, e em parte do Maranhão, Piauí e Bahia, que conjuntamente formam o pólo de produção agrícola conhecido como Matopiba. O referido autor trouxe expressivos índices de supressão de matas nativas, mesmo considerando diferentes possibilidades futuras de expansão da soja, cenários estes derivados das eficiências legislativas na proteção das Unidades de Conservação contra este setor de interesse industrial do Cerrado brasileiro. Deste modo, mesmo observado rigorosamente a Lei Federal nº 9985 de 18 de Julho de 2000, cerca de 15% do Cerrado será desmatado, e isto se dará, principalmente, pela ampliação deste sistema agrícola. Caso a expansão destas espécies vegetais de valor econômico seja tendencial há certa probabilidade de que 17% das fitofisionomias do estado sejam devastadas nos próximos anos. Em um cenário isento deste exercício sustentável e imposto por lei, quase 21 % das terras tocantinenses serão substituídas pelo setor agropecuário (AGUIAR, 2016).

Dentre as culturas energéticas que mais produziram óleo está a sojicultura, que representa 27,76% das toneladas métricas mundialmente produzidas. A soja no ranking dos percentuais de consumo para este último ano safra perde apenas para o azeite de Dendê (USDAa, 2020). O Brasil tem se destacado na produção de soja, representando um percentual de 36,55% do que é produzido no mundo em grãos (USDAb, 2020). O Estado do Mato Grosso ocupa a primeira posição correspondendo a cerca de 27% da produção brasileira. Já o Estado do Tocantins tem se apresentado como o sétimo maior produtor das unidades federativas,

representando 2% do que é produzido nacionalmente. Todavia, o estado tocaninense perde algumas posições como potência agroindustrial no que diz respeito à receita bruta de suas produções. Este Estado assim posiciona-se como a décima primeira economia neste setor (IBGE, 2017).

A produção dos grãos da soja, em seu estágio reprodutivo, de florescimento e enchimento de grãos, é altamente dependente da precipitação média local. Estima-se que variações neste parâmetro induzem flutuações nos rendimentos em diferentes anos safras e regionalidades. Um cultivar de soja mesmo desprovido de técnicas de manejo apropriadas, como irrigação e planejamento das épocas de semeadura, no enfrentamento de condições naturais de deficiência hídrica deve sobreviver. A longevidade de desenvolvimento da planta permite seu estabelecimento mesmo em face à escassez de água. Mas alguns aspectos fisiológicos, como sua estatura, são prejudicados (CUNHA et al., 2018). Isto por consequência restringe seu metabolismo e desempenho fotossintético, o que não é de interesse industrial, como no panorama atual da crescente geração de biocombustíveis.

Mesmo em regiões de chuvas regulares e favoráveis, verificam-se em experimentos a dependência das características agrônômicas às lâminas de água aspergidas, conforme o identificado por Gava et al. (2018). Estes autores constataram diferenças significativas em alturas da planta, número de vagens e grãos por planta e dentre outras variáveis, exceto para o peso de cem grãos e o próprio rendimento para diferentes cultivares por meio de irrigação com pivô central. Julgaram que estes resultados se devem ao caráter de plasticidade desta espécie em estudo, que apresentou um crescimento radicular menor em razão destes excedentes hídricos (50 a 70 % da evapotranspiração da cultura). Ratificam assim a alta dependência do enchimento dos grãos aos aspectos agroclimáticos, em uma comparação com outros autores que realizaram a cultura em sequeiro. Uma gama expressiva de trabalhos surgiu recentemente na tentativa de estimular esta profundidade efetiva, pela manipulação genética das raízes destes indivíduos, como o proposto por Li Song et al. (2016).

Os modelos climáticos regionais prospectam uma série de regiões com fragilidades climáticas num futuro próximo. Estas modelagens traçam riscos probabilísticos altos para um declínio em curto prazo das disponibilidades hídricas (IPCC, 2015) e, conseqüentemente, de suas aptidões e produtividades agrícolas. As pegadas hídricas (PHs) dos poderes públicos municipais da região do Matopiba decrescem continuamente especialmente em relação a componente verde, que reflete a disponibilidade hídrica desta oleaginosa, à medida em que as mudanças climáticas configurem contextos de maiores temperaturas e menores precipitações médias anuais. A vertente de PH azul que rege da tomada de recursos hídricos, todavia, se

comporta diferentemente ao longo do século para a mesma região em uma taxa crescente de 15%, o que fundamenta uma aplicação mais efetiva de métodos de irrigação nos cenários futuros de concentração de GEEs (SILVA, 2018).

Os Zoneamentos Agrícolas de Riscos Climáticos (ZARCs) da soja podem variar num futuro próximo conforme o manejo das concentrações de poluentes atmosféricos prospectados. Essa variação pode impactar as Unidades de Conservação do Estado do Tocantins, de modo a comprometer seu viés de proteção à biodiversidade, devido a uma maior prospecção por área deste sistema produtivo. Para validar esta hipótese foi conduzido uma acoplagem de modelos, de solos, de clima e de dinâmica territorial. Todas as variáveis foram explicitadas geograficamente. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar o avanço da soja sob diferentes cenários de riscos climáticos, um otimista, RCP 4.5, e outro pessimista, RCP 8.5, entre os anos de 2021 e 2050 pelo modelo MIROC5, avaliando as pressões deste sistema produtivo no bioma Cerrado e nas Unidades de Conservação no Estado do Tocantins.

## **2 - OBJETIVOS**

### **2.1 - Objetivo geral**

Realizar uma análise espacial prospectiva do sistema produtivo da soja no Estado do Tocantins, considerando diferentes cenários de riscos climáticos, e possíveis reflexos em Unidades de Conservação.

### **2.2 - Objetivos específicos**

Elaborar rotina algorítmica para otimizar a obtenção dos parâmetros da curva de retenção da água no solo e gerar um mapa da capacidade de água disponível para o Estado do Tocantins;

Aperfeiçoar rotina algorítmica de simulação de cálculos de balanço hídrico decenal de modo a delinear as áreas de maior risco climático para o desenvolvimento da cultura da soja e suas janelas de semeadura no Estado do Tocantins, para o clima atual e futuro;

Prospectar tematicamente a expansão da soja no Estado do Tocantins e no entorno das Unidades de Conservação em um modelo autônomo celular, o Dinamica EGO, por meio de variáveis climáticas simuladas pelo modelo MIROC5 na perspectiva dos cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5, para o período de 2021-2050.

### 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 - Cultivo da soja no Estado do Tocantins

No Norte do Brasil em termos de produção destacam-se dois grandes sistemas produtivos, segundo o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) pela plataforma de Produção Agrícola Municipal (PAM), a soja e o dendê. Segundo estas estatísticas do IBGE (2018), a região norte e nordeste tem se mostrado com menores produções em toneladas de soja (*Glycine max*) nos últimos anos safras, se comparadas as demais macrorregiões.

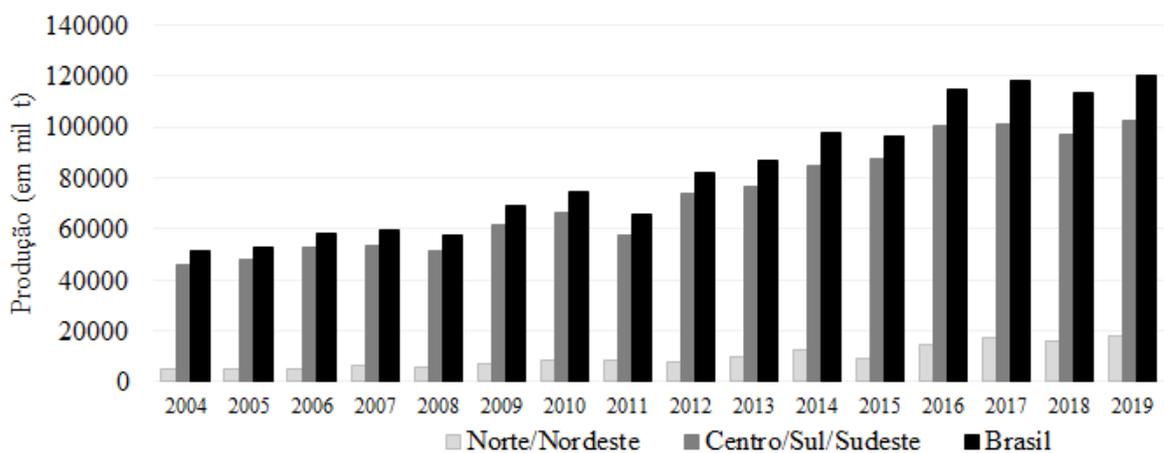
A soja teve uma ascensão linear considerável na última década, considerando a safra de 2004/2005 à de 2019/2020, sendo que no norte e nordeste do Brasil seu valor em produção triplicou, aumentando em 3,4 vezes (IBGE, 2018; IBGE, 2020). Este crescimento foi ligeiramente mais acentuado que as demais macrorregiões, mas são considerados iguais estatisticamente pelo teste t de Student a 5% de significância. Todavia ainda é perceptível que o centro, o sul e o sudeste do país perfazem em larga distância as maiores produções nacionais, de acordo com a Figura 2.

Em relação ao Matopiba, a soja teve uma expansão fronteiriça maior em relação à outras culturas agroenergéticas, como o dendê, a mamona e o amendoim, aumentando sua área em aproximadamente 141% e suas produções em 200% de 2004/2005 a 2019/2020, alcançando 4.330.724 ha e uma produção de 14,6 milhões de toneladas. O Tocantins perde apenas para o Piauí nas aquisições liquidadas territoriais, com um acréscimo de 179% de área de cultivo da soja, no mesmo período. Realizando o mesmo trabalho de quantificação das produções e áreas destinadas ao plantio de soja, no entanto para todos os municípios pertencentes ao Matopiba, Gamba; Collicchio (2018) notaram que embora o Tocantins tenha mais do que duplicado sua área, e o Piauí adquirido 3,5 vezes mais terras cobertas por esta oleaginosa, o Estado da Bahia continuou apresentando os maiores valores de produção neste decênio, como observado na Figura 3.

Percebe-se que o Tocantins tem se demonstrado promissor e com participação expressiva neste sistema produtivo no contexto do Matopiba e da região Norte. Com relação à produção de soja no Estado do Tocantins destaca-se que na safra de 2019/2020 foram estimadas 3.053.809 toneladas, com produtividade média de 3.08 t/ha numa área total de 990.767 hectares (IBGE, 2020). O cultivo da soja no Tocantins tem-se expandido consideravelmente pelo território. A Figura 4 mostra a evolução da área plantada desta cultura nas cinco principais

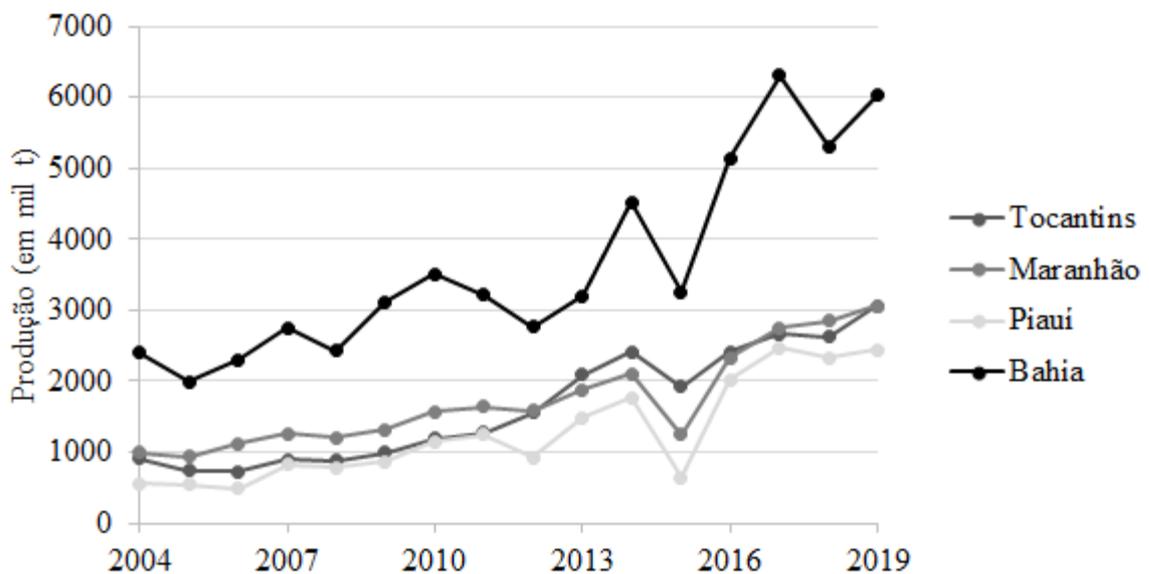
microrregiões produtoras tocantinenses, no período de 2004/2005 a 2017/2018 (IBGE, 2018). Imediatamente se sobressai na Figura 4 a microrregião de Gurupi, TO, por ter apresentado na safra de 2017/2018 uma área de soja 7,2 vezes maior do que a existente no ano safra de 2004/2005, localizada no centro sul do limite estadual e fortemente influenciada por um pólo agroindustrial da soja já consagrado, o da microrregião de Porto Nacional. O domínio regional portuense ocupa 164.297 ha (16,58% das áreas tocantinenses plantadas) e produz cerca de 435.742 toneladas (IBGE, 2018).

Figura 2 – Produção de soja (em mil t) nas macrorregiões no período de 2004 a 2019



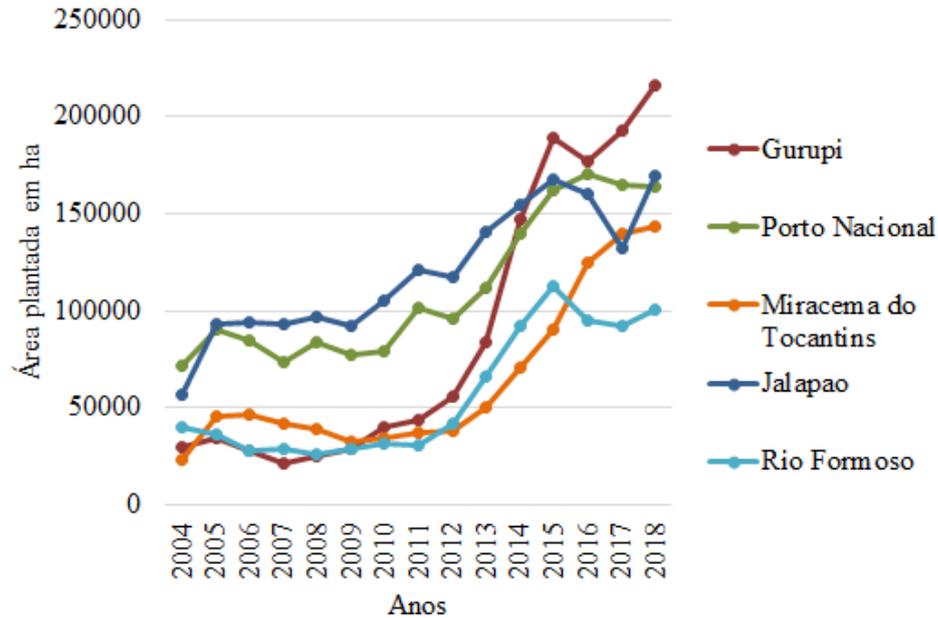
Fonte: Autor (IBGE, 2018; IBGE, 2020).

Figura 3 – Produção de soja (em mil t) nos estados pertencentes do Matopiba, entre os anos safras de 2004/2005 a 2019/2020



Fonte: Autor (IBGE, 2018; IBGE, 2020).

Figura 4 – Evolução da área plantada de soja (ha) nas microrregiões do Tocantins, no período de 2004 a 2017



Fonte: IBGE (2018).

### 3.2 - Curvas de retenção de água nos solos

Vários modelos surgiram para solucionar o complexo sistema interativo entre solo, planta e água. Dentre estas modelagens observadas, encontram-se aquelas que associam as características físicas dos solos com seus potenciais hídricos, fundamentalmente expressos nas chamadas curvas de retenção de água (CRA). As mesmas são conceitualmente descritas como modelos que correlacionam as tensões matriciais do solo às suas respectivas quantidades de água retidas (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015).

A CRA é diretamente determinada por uma mesa de tensões ou por uma câmara de Richards. As pressões de sucção apreciadas tendem a oscilar em função dos parâmetros mais trabalhados na Física dos solos, como a densidade aparente do solo, a mineralogia do mesmo, sua distribuição granulométrica, macro e microporosidade e dentre outros elementos texturais e estruturais do mesmo. Notadamente percebe-se que a retenção de água no solo é dependente da estrutura quando próxima à capacidade de campo, onde as tensões matriciais são menores, e, por conseguinte, quando elevadas, essa correlação é impactada pelo arranjo textural (COSTA; ALVES; SOUSA, 2016).

Figueiredo et al. (2008) em ensaios experimentais em Latossolos no Cerrado brasileiro examinou mudanças reducionais altas nas quantidades de água armazenadas em solos recém revolvidos em uma gama de sistemáticas de manejo utilizados, variando entre 40 a 47%. Este

revolvimento é um exemplo prático da dependência da capacidade de retenção de água à arquitetura do solo (à sua estrutura). Esta correspondência se explica pela obliteração da microporosidade e subsequente criação de macroporos na fração de solo deformada.

O mesmo estudo ainda faz referência às práticas de calagem e de adubação fosfatada para recuperação físico hídrica de pastagens degradadas e do papel da matéria orgânica (MO) aumentada pelo sistema de plantio direto em solucionar problemáticas como o adensamento excessivo do solo também verificado por esta mesma técnica agrícola.

Anjos et al. (2017) também avaliou as diferenciações agrônômicas, no índice de área foliar, e física, no armazenamento diário de água no solo pelo incremento de MO originada da decomposição das palhadas da cana de açúcar na sua fase de maturação.

Estes estudos vêm a postular uma oscilação dos índices físicos em função da diversidade de usos e ocupações territoriais. Porém Kemerich et al. (2018) atentaram que para algumas culturas como a soja, estas modificações não foram significativamente assistidas. Neste caso foi provada a ausência de mudanças nos parâmetros de ponto de murcha permanente (PMP), de capacidade de campo (CC), de teor de argila e para condutividade hidráulica entre este sistema produtivo (a sojicultura) e a floresta nativa. Apenas houve diferenças expressivas estatisticamente para o PMP entre a floresta nativa e os outros usos como áreas urbanizadas, pastagens e o plantio de arroz (KEMERICH et al., 2018).

As técnicas de escarificação e da taxação de gesso nas superfícies a serem plantadas tendem a transformar a estrutura, deformando a CRA no sentido de melhorar a qualidade de outros fundamentos físicos e hídricos dos solos. Escarificar é a inserção de hastes metálicas no solo de modo a rompê-lo sem danos mais agressivos do que o revolvimento anteriormente citado. Conquanto a aplicação do gesso agrícola age fisicamente como a MO no sentido de trazer a coesão esperada, agregando as partículas do solo e garantindo-lhe ideal condutividade hidráulica. Sendo que esta última variável última assume uma grande importância fisiológica para a planta no seu processo de extração da água armazenada no solo e invariavelmente na fixação de nitrogênio (FREITAS et al., 2017).

Os solos do Cerrado como os latossolos e os plintossolos são de composição altamente ácida, com presença forte de alumínio. O trabalho de Freitas et al. (2017) averiguou o retraimento deste micro mineral tóxico de um solo da classe latossolo vermelho de natureza plíntica por causa do incremento de quantidade de cálcio, adicionado pelo produto químico citado, o gesso. Esta restauração física resultou de um delineamento experimental cujos tratamentos foram as técnicas de escarificação e a aplicação ou não do gesso agrícola. Este teve maior preponderância nos efeitos físicos qualitativos, numa diminuição da densidade do solo e

num aumento da porosidade total (FREITAS et al., 2017). Segundo esses autores o produto ao associar-se ao alumínio e formar íons não deletérios à saúde do vegetal é um facilitador da penetração de suas raízes e do desenvolvimento da cultura.

Conforme já explicitado, o comportamento gráfico das CRAs tende a se modificar em escala regional, principalmente entre diferentes classes pedológicas e em consequência das alternâncias de usos e dinâmicas ocupacionais. Solos com textura argilosa tendem a reter mais água do que aqueles com textura franco arenosa como o retratado experimentalmente por Bruning et al. (2017). Solos com mesma classificação dificilmente terão suas CRAs dessemelhantes se estritamente estudado por critério textural. Em uma mesma classe pedológica predomina-se um mesmo fracionamento percentual de teores de silte, argila e areia total, e este último não varia a médio e nem longo prazo, posto que o intemperismo mineralógico ocorre em tempo geológico e não em razão de dinâmicas territoriais (PEQUENO et al., 2018).

Ao passo que a CRA induz o conhecimento de alguns componentes pedológicos intrínsecos, a mesma por consequência auxilia no planejamento agrícola. Ou seja, seus caracteres podem exprimir quando e em que quantidade uma cultura deve ser irrigada. O descontrole dos alicerces da qualidade física pode implicar preços ambientais irreparáveis, impactos socioeconômicos e naturais em outros compartimentos como o assoreamento de rios, por meio de processos erosivos, e outros possíveis cenários de poluição difusa.

### **3.3 - Funções de pedotransferência (FPT) aplicadas em solos do cerrado do Tocantins**

Os métodos diretos de determinação de umidade no solo têm se demonstrado laboratorialmente trabalhosos e susceptíveis a variações significativas, sobretudo na determinação de altas pressões necessárias para diagnóstico do ponto de murcha permanente (PMP). Esta prerrogativa se aplica a uma gama de outras incógnitas que dizem respeito à ciência da pedologia sejam elas físicas ou químicas quando exigidas de exaustivos métodos laboratoriais e equipamentos ou materiais que inviabilizam financeiramente sua aplicação em larga escala, para análises regionais, as quais podem ser estimadas por equações que as associam com outros parâmetros de fácil acessibilidade (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015).

Essas regressões lineares estabelecidas com o ensejo de retrabalhar essas peculiaridades dos solos para obtenção de suas propriedades hidráulicas inexistentes exigem de um arcabouço estatístico para sua validação. Esta técnica se conceitua no encontro de medidas tendenciais de

erro para comparação de suas eficiências de precisão, que conforme Minasny; Mcbratney (2002) é a relação entre a qualidade da informação e o esforço gerado para sua efetivação.

Por intermédio de uma simulação de Monte Carlo, Minasny; Mcbratney (2002) perceberam que os esforços medidos em tempos de execução dos métodos diretos são significativos e que as melhorias das incertezas tornam-se igualmente maiores (menores desvios padrões das variáveis da curva de retenção do que as previstas pelas FTPs). As incertezas assim para estas metodologias foram baixas em função da variável de esforço.

O mesmo estudo mostrou que a FTP para valoração das propriedades hidráulicas com o uso da distribuição da textura alcançou segunda maior eficiência, dada melhor relação entre o índice de dispersão e o menor esforço de predição. Um comportamento parecido foi diagnosticado quando a eficiência foi computada como uma relação entre a qualidade e os custos de aquisição dos informativos gerados (tanto para umidade em função da tensão matricial e desta para a condutividade hidráulica). Porém, o mesmo foi avaliado de maneira inversa quando estas precificações foram comparadas com as atribuições de valores da informação, conceito de eficiência de grande relevância em um modelo de gestão de negócios. Nisto a correlação dos parâmetros com as classes texturais (as FPT) apresentou os piores resultados. Isto induziu conclusivamente a ideia de que uma vez não sendo limitantes de desenvolvimento do projeto a quantidade de amostras, o esforço para sua obtenção e nem sua viabilidade econômica, opta-se pelos métodos diretos contra as FPT (MINASNY; MCBRATNEY, 2002).

Prevedello; Armindo (2015) ainda relacionou uma sequência de autores que em suas pesquisas demonstraram a incompatibilidade das FPT com localidades de climas diferentes. Assim sendo, equações características de climas temperados não são aconselháveis em ambientes de clima tropical. As relações de previsão também se diferem regionalmente quanto as classes pedológicas, não somente por serem mais intemperizáveis nas temperaturas altas (tropicais), mas também pelas diferenças granulométricas, fundamentalmente no teor de argila.

Os mesmos autores tipificam as funções de pedotransferência, em FPT de classe, contínua e pseudocontínua. As de classe relacionam os intervalos (classes) de matrizes de textura de um tipo de solo com as umidades e outros parâmetros físicos hídricos. As contínuas verificam estes últimos a partir de dados granulométricos amostrados. As pseudocontínuas são conhecidas por estimar os valores das umidades volumétricas pelo uso de condicionantes físicos quantitativos, mas sem expressar os coeficientes de um modelo que as definem em razão de seus potenciais matriciais, de forma paramétrica, como o de van Genuchten (1980). Outras classificações partem destas como as FPT paramétricas citadas e pontuais, que evocam somente um dos caracteres hidráulicos da CRA, como a capacidade de campo (CC).

O Estado do Tocantins tem 91,1% do seu território pertencente ao bioma Cerrado cuja fitofisionomia predominante é o cerrado sentido restrito. Parte da microrregião do Bico do Papagaio, localizada na margem oeste, ocorre o bioma Amazônia, em aproximadamente 8.9% de todo o território estadual.

A Embrapa inventariou o carbono orgânico do solo (COS) para todas as unidades federativas do Brasil. E este parâmetro pode ser correlacionado linearmente, em uma função de pedotransferência (FPT), com outros elementos físicos ou químicos, como a densidade do solo (CORDEIRO et al., 2020; SOUZA et al., 2016), a capacidade de troca catiônica (CTC) e a soma de bases (SB), gerando mapeamentos de indicadores de fertilidade do solo (OLORUNFEMI; FASINMIRIN; OJO, 2016).

A saturação de bases, juntamente com o pH, também corrobora para a determinação indireta do fósforo remanescente, inversamente proporcional ao teor de Gibbsita e Goethita, dentre outros elementos com cargas positivas responsáveis pela adsorção do fósforo advindo de fertilizantes. O método de valoração deste atributo (por isotermas de adsorção) é encarecido quando tratado a partir de um grande número de amostras (CAGLIARI; VERONEZ; ALVES, 2011). O COS também pode ser, em parceria com os percentuais granulométricos, utilizado como uma variável preditora da quantidade de fósforo no solo, sendo, portanto, um componente funcional para diversas avaliações regionais e planejamentos ambientais (KHALEDIAN et al., 2018).

Martins et al. (2015) realizou um experimento para verificar as mudanças dos parâmetros físicos e químicos em um solo nativo do cerrado e outros pontos referenciais de uma área de soja plantada a dois anos, outra de 5 anos e outra de 8 anos de plantio, simulando assim o efeito da soja na qualidade química dos solos. Por intermédio destes dados criou-se uma fórmula linear relacionando a soma de bases (como variável dependente) e a matéria orgânica do solo (t/ha) amostradas, afim de confeccionar um mapa indicador da fertilidade do solo no Estado do Tocantins. Para comparar com este levantamento químico utilizou-se de outra equação já elaborada por Schiavo et al. (2011) em um latossolo vermelho argiloso com fitofisionomia de Cerrado em um experimento que avaliou diferentes manejos. As equações e suas respectivas estatísticas se encontram no Quadro 1.

Quadro 1 - Equações que relacionam a soma de bases com o carbono orgânico do solo e suas respectivas validações estatísticas

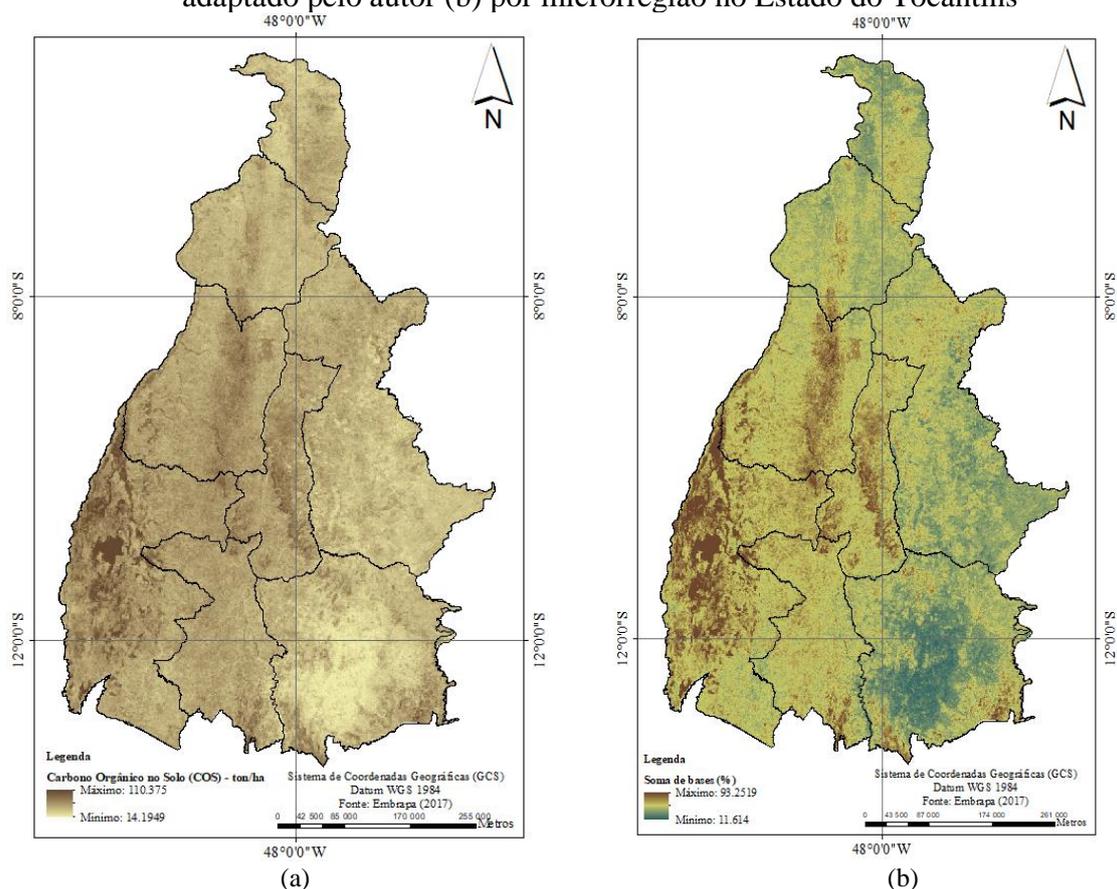
<b>Autores</b>	<b>Equações</b>	<b>Resultados de significância</b>
(MARTINS et al., 2015)	$SB=0,0815.COS+38,7162^*$	Correlação se mostrou significativa por teste t de Student e teste F a 5% de significância. $R^2=0.47$ .

(SCHIAVO et al., 2011)	SB=0,6901.COS-0,4346	Correlação se mostrou significativa por teste de diferenças mínimas significativas (DMS) a 1% de significância. R <sup>2</sup> =0.64.
------------------------	----------------------	---

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Schiavo et al. (2011) percebeu que as áreas cultivadas com milho retinham maiores somas de base do que o cerrado nativo, facilmente explicável pelos procedimentos de calagem realizados nas áreas agricultáveis. Este fato alia-se ao entendimento de que a SB e o COS são diretamente proporcionais, e estabelecidos em correlações diretas e positivas tal como se observa nas equações definidas pelo Quadro 1. Logo, o mapeamento da soma de bases no Estado do Tocantins uma vez determinado pela segunda FPT enquadrada acima informa uma grande quantidade de cátions trocáveis e possível fertilidade na microrregião do Formoso, em especial à Lagoa da Confusão, Figura 5-b. Esperava-se a concentração deste índice nestes municípios pois o diagnóstico de produções municipais do IBGE os retratou como um dos maiores produtores de soja no Estado (IBGE, 2017). A Figura 5-a evidentemente espelha os locais de maior ocorrência de matéria orgânica no solo.

Figura 5—Mapa de Carbono Orgânico no Solo - COS ( $t \cdot ha^{-1}$ ) da Embrapa (2017) (a) e da soma de bases (em %) utilizando a função de pedotransferência - FPT de Schiavo et al. (2011), adaptado pelo autor (b) por microrregião no Estado do Tocantins



### 3.4 - Aspectos edafoclimáticos da soja

O crescimento da soja está associado a dois períodos distintos de desenvolvimento, a fase vegetativa e a fase reprodutiva. O discernimento destas etapas de formação é essencial para a definição das estratégias de intervenção de manejo. Durante o período vegetativo, que se inicia da emergência dos cotilédones do solo e termina no último estágio de florescência, há a inicialização de todas as estruturas primárias que compõem essa espécie, seu caule e nós de ramificações, seu sistema radicular, bem como o meristema apical que dá origem à sua composição aérea. Deste modo a produtividade da cultura está intimamente ligada à esta primeira evolução vegetativa (LOPES, 2013).

O período reprodutivo da soja começa a partir de sua floração e se caracteriza pelo processo de enchimento de seus grãos, alcançando a sua maturidade ao atingir 15% de umidade, que é um parâmetro de colheita. Logo percebe-se uma demanda hídrica maior em sua constituição inicial (período vegetativo), ao adquirir matéria seca e durante a finalização de sua etapa de reprodução (fase reprodutiva), ao acumular nutrientes. Esse acúmulo de massa denota um maior índice de área foliar (IAF), relação entre a área foliar e a área do terreno ocupado por uma planta, e de altura do cultivar, o que expõe uma possível correlação entre estes fatores e a evapotranspiração real máxima de uma cultura (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

Assim sendo algumas características hidroclimáticas são constantemente averiguadas no processo vegetativo, em especial para a germinação na planta onde a mesma deve possuir no mínimo 50% de água em seu peso e no máximo 85%, bem como um mínimo de 50 % de água disponível no solo, antes de atingir sua emergência (fase VE). Isto se deve em razão da planta normalmente (sem intervenções hormonais) absorver mais nutrientes nesses estádios fenológicos em relação ao subsequente, que os utiliza translocando os mesmos entre suas unidades morfológicas. A fase vegetativa traz características descritoras da extensa gama de genótipos utilizáveis, como o comprimento do pecíolo das primeiras folhas unifoliadas (V2) e trifoliadas (V3), permitindo a separação de suas características fenotípicas, e por conseguinte sua variedade genética (PIERDONÁ et al., 2018).

Na fase reprodutiva, a soja tende ao seu máximo de umidade constitutiva requerida (necessidade hídrica) em aproximadamente 7 a 8 mm/dia, especialmente para as fases de florescimento (das fases R1 e R2), formação da vagem (R3 e R4) e enchimento dos grãos (R5e

R6). As duas demais etapas desta fase são de maturação (R7 e R8) que relativamente não demandam de maior disponibilidade hídrica (ZANON et al., 2018).

Em caso de expansão agrícola, novas circunstâncias edafoclimáticas são estabelecidas e a probabilidade de perigo de um possível déficit hídrico aumenta substancialmente, se acaso o produtor não utilizar do zoneamento de risco climático. Na germinação, as sementes necessitam de no mínimo 50% de seu próprio peso. Durante a floração, se as folhas não renderem o mínimo estabelecido de umidade para seu desenvolvimento em termos hídricos, pode ocorrer o enrolamento das folhas e a consequente desmantelamento das vagens antes do amadurecimento necessário as mesmas (FIETZ; URCHEI, 2002).

Estima-se que ao longo de seu crescimento determinado ou indeterminado (a depender respectivamente da existência do remate superior do caule conhecido como racemo floral) o rendimento máximo de um cultivar de soja exige que a planta demande entre 450 a 800 mm de água para justificar suas necessidades hídricas por ciclo. Há também outras exigências, em termos de temperatura e fotoperíodo. Tais espécies oleaginosas apresentam temperaturas ótimas de crescimento de 20 a 30°C (temperaturas inferiores a 10 °C podem causar retenção foliar, atraso de seu florescimento e aquecimentos superiores a 30 °C, a senescência de suas flores, agilizando sua maturação), e exigem uma temperatura ótima de solo próxima de 25 °C. Ressalta-se também que são plantas de dias curtos, estabelecendo sua florescência em dependência do fotoperíodo (comprimento do dia) de sua variedade (EMBRAPA, 2011).

Para entendimento da relevância da capacidade de armazenamento da água no solo deve-se entender como os aspectos edafoclimáticos de uma cultura se comportam em detrimento desta variável. Solos com texturas argilosas, possuindo capacidades de água disponível mais favorecidas do que os de textura arenosa e com disponibilidade hídrica maior tendem a possuir uma evapotranspiração real (ETR) mais próxima de sua máxima utilização, sem restrições hídricas, denominada de evapotranspiração de cultura (ETc) (GOMES, 2005). Entende-se pela ETc como uma variante da ETp que igualmente exprime percepções hidrológicas ideais de evapotranspiração apenas de numa superfície natural saturada, com umidade próxima à capacidade de campo (CAMARGO; CAMARGO, 2000). Juntamente com o fotoperíodo, a temperatura e a precipitação, essa característica de uma cultura é outro condicionante que varia os riscos da instalação da soja (BRASIL, 2019).

Alguns coeficientes agronômicos de uma espécie recém implantada poderiam interferir quantitativamente na cobertura de solo sem manejo agrícola, mais precisamente em sua ETp, o que foi proeminente para a criação da evapotranspiração da cultura (ETc), saída do balanço hídrico climatológico de uma cultura local. Sendo este último considerado como uma métrica

de contabilização da água em um sistema agrícola. Por isto se faz uso constante do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) que compara a  $ET_c$  da cultura com uma espécie de referência, que convencionalmente trata-se de uma cobertura com gramínea da espécie *Paspalum notatum* Flugge (grama batatais) (DOORENBOS; PRUITT, 1975).

Inúmeros são os métodos de determinação da  $ET_p$ , sendo que o mais empregado é uma adaptação da Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) do método de Penman-Monteith. Este possui grande poder de mensuração da real evapotranspiração em campo e em escala diária, no entanto, o excesso de informações viáveis a serem amostrados dentro de uma normal climatológica não são por vezes abordados em estações suficientes para o mapeamento regional desta condicionante climatológica. Outros métodos mais simplistas que para sua solução se contentam apenas de uma única variável dependente, a temperatura, são comumente usados e de eficiência comparada a este último explicitado como mais convencional (SENTELHAS, P.C; GILLESPIE, T.J; SANTOS, 2010). Dentre estes, destaca-se o método elaborado por Thornthwaite (1948).

O método de Thornthwaite não necessita de umidade relativa do ar como para o método originário da adaptação da FAO do Penman-Monteith e também não depende de outros expoentes climáticos, como a radiação solar, que é essencial para o de Camargo; Camargo (1983), visto como uma reformulação de Thornthwaite apropriada para análises decendiais e mensais. Ou seja, o método demanda unicamente das temperaturas médias do período em observação. A temperatura média anual ( $T_a$ ) dos 30 anos da série histórica servirá para definição do índice climático I, conforme equação 1, e este último para o consequente índice climático “a”, conforme equação 2 (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

$$I = 12. (0,2. T_a)^{1,514} \quad (1)$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7}. I^3 - 7,71 \times 10^{-5}. I^2 + 1,7912 \times 10^{-2}. I + 0,49239 \quad (2)$$

A partir destes índices são estimadas a  $ET_p$  em mm por mês, considerando alguns equacionamentos, cuja escolha dependerá da temperatura média mensal utilizada. Se menor do que 26,5°C a  $ET_p$  (em mm/30 dias) será encontrada pela equação 3, conquanto caso a  $T_i$  (temperatura média do mês i) seja superior a essa temperatura, então adota-se a equação 4.

$$ET_p = 16. \left( \frac{10. T_i}{I} \right)^a \quad (3)$$

$$ET_p = -415,85 + 32,24. T_i - 0,43. T_i^2 \quad (4)$$

### 3.5 - A retenção de água e a regulação de nitrogênio para a sojicultura

Consideram-se diversos os mecanismos tecnológicos para aperfeiçoamento dos coeficientes de produtividade média dos grãos de soja nas Ciências Agrárias. O controle de plantas daninhas, a densidade de plantio, as manipulações de espécies genéticas adaptadas e a época de semeadura são parte integrante de um aporte técnico comumente adotado nas últimas décadas, com objetivo de melhorar os rendimentos agrícolas. Outra alternativa está no conhecimento da interdependência entre seus aspectos fisiológicos e metabólicos às condições físico pedológicas e climáticas locais que são por vezes relatados como fatores limitantes de investimentos locais (MORANDO et al., 2014).

Uma forçante da evolução sustentável do sistema produtivo da soja está na regulação de seus nutrientes fundamentais, como o nitrogênio. Por vezes essa relação simbiótica entre a planta e as bactérias fixadoras deste nutriente é dependente internamente dos seus sinais hormonais, mas existem situações em que o caractere restrigente para este processo é também o armazenamento de água do solo. Umidades excessivas e residuais, próximas à capacidade de campo ou a de um PMP respectivamente, podem induzir a criação de espaços anóxicos, com ausência de oxigênio, o que pode tornar estas áreas inóspitas a estes microorganismos. Essa atividade de fixação biológica do nitrogênio tem grande valor por substituir o uso intensivo de fertilizantes agrícolas, ou seja, reduz os custos de produção deste empreendimento (BRANDELERO; PEIXOTO; RALISCH, 2009).

Lima; Pelúzio; Sousa (2017) e Lima et al. (2017) destacaram, por meio de uma revisão sistemática de literatura e por um delineamento experimental entre épocas de semeadura, manejos de irrigação e genótipos de cultivares de soja no Estado do Tocantins, dois fatores que podem prejudicar a síntese de proteínas e em consequência potencializar os maiores teores de óleo na cultura da soja. Os autores identificaram que quantias menores de nitrogênio absorvidas na interface entre solo e planta, influenciadas por determinantes climáticos como a deficiência hídrica e as altas temperaturas regionais, que são os maiores ameaçadores da sobrevivência dos microrganismos fixadores dos compostos nitrogenados, na fase de enchimento de grãos podem favorecer o uso de fotossintetizados na biossíntese de óleo. Estes seriam primeiramente, dadas às condições ambientais adequadas, utilizados na formação de proteínas.

Neste caso a presença de nitrogênio explicaria a correlação negativa entre a síntese destes dois produtos. Lima et al. (2017) também verificaram que a menor retenção de água da espécie, pelas diferenças de manejo de irrigação nas fases anteriores à maturação em um tipo

de cultivar, influenciou significativamente nos teores de óleo. Isto se deve provavelmente pela dependência de água na estruturação de carbono dos complexos lipídicos. Quanto maiores as deficiências menores são as concentrações observadas de lipídeos, tendo essa relação também verificada em literatura (LIMA; PELÚZIO; SOUSA, 2017).

### **3.6 - Estudos de aplicação com Dinâmica EGO**

Vários modelos espaciais dinâmicos vêm sendo utilizados para analisar prospectivamente as diversas variáveis ambientais. Mas et al. (2015) perfaz um comparativo entre os mais usuais na tematização das transições de usos e ocupações da terra. Dentre eles citam-se: o modelo LCM, o CA\_MARKOV, o CLUE-S e o DINAMICA EGO.

O Dinâmica EGO apresentou melhor contextualização da realidade ocupacional dada sua parametrização ser estocástica, considerando valores de média e de variância, bem como de similaridade para os segmentos de transformação por expansão (expand) e criação (patch) de manchas transicionais (MAS et al., 2015).

Estas ferramentas permitem o acoplamento de outros submodelos, de modo a preencher alguns de seus dados de entrada ou a vincular o potencial de influência deste condicionante natural passível de modelagem em relação a outro. Como exemplificação, tem-se o trabalho desenvolvido por Lacher et al. (2018), que usou da plataforma Dinâmica EGO para indexar ao algoritmo de determinação espacial dos usos e ocupações um modelo de bacia hidrográfica referente ao transporte de sedimentos, fluxo de nutrientes como fósforo, nitrogênio e sólidos totais suspensos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar as variações sedimentológicas na bacia hidrográfica da baía de Chesapeake onde se localiza o Parque Nacional de Shenandoah, na Virgínia, Estados Unidos da América, em razão das diferenciações de ordenamentos territoriais. Este sinergismo, entre diferentes modelos, proporcionou um melhor esclarecimento dos efeitos da exploração dos recursos ecossistêmicos. Tal instrumento, consolidado, assume caráter por vezes político e de gestão de recursos hídricos, na imposição de limitações de outros caracteres de desenvolvimentos regionais, como o próprio agronegócio, em função de princípios sustentáveis de planejamento, almejando a recuperação da qualidade e disponibilidade de água (LACHER, 2018).

Lacher (2018) observou durante os métodos de calibração que a distância entre as áreas urbanizadas e a densidade populacional foram as variáveis que mais influenciaram na dinâmica dos usos simulados, dentre outros vários indicadores socioeconômicos e naturais estudados de

uma série histórica de 50 anos. Percebeu ainda conclusivamente que reduções nas áreas florestais impactavam diretamente na produção média por distrito de compostos nitrogenados ao longo da bacia, caracterizando essa mudança como propulsora de ambientes sujeitos a eutrofização (LACHER, 2018).

No México a utilização do modelo de predição espacial das classes temáticas de uso e ocupação encontraram sua aplicação na mensuração das perdas em biodiversidade na região costeira do Estado de Oaxaca. A região possui um inventário de espécies animais e vegetais que são significativamente representativas do país, em quantidades percentuais (LEIJA-LOREDO et al., 2016). Dentre as incógnitas problematizadas que poderiam calibrar a dinâmica de uso, o produto interno per capita relativamente baixo, em comparação ao produto interno bruto nacional, e o turismo crescente intensificaram as transformações diagnosticadas. Ou seja, neste estudo de caso foram gerados mapas que notoriamente expõem o desmatamento dos manguezais e florestas dos dois municípios, maiores partícipes da riqueza sociocultural mexicana, pela infraestrutura comercial (derivada da exploração turística) e precipuamente das atividades agrícolas em taxas de remoção de selva e mangues, respectivamente próximas a 2,8 e 4,4 % (LEIJA-LOREDO et al., 2016).

O Dinâmica EGO é um software de código livre e foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, e parte significativa do número de publicações que utilizam dessa modelagem advém desta instituição. Pode se citar, como exemplo, o trabalho de análise prospectiva do desmatamento pelo avanço da fronteira agrícola no Estado de Minas Gerais. Essa projeção teve alguns pesos de evidências e parâmetros de expansão (expanser) e de formação de manchas (patcher), expressões de mudanças, alteradas para identificar três cenários distintos. Se modificados os pesos ocorrem diferenças nas distribuições espaciais das classes, conquanto se novamente parametrizados haverá novas taxas líquidas de transição (STAN, 2015).

Uma destas visões simuladas de crescimento é tendencial, onde o agronegócio segue seu comportamento sem restrições legais. Em outro há uma simulação de aumento de desmatamento derivado da subtração de penalidades e outros dispositivos reguladores do código florestal. Também se desenvolve um último cenário que aborda a adoção do Brasil à meta Aichi, em favor da biodiversidade, que consiste em frear o desmatamento numa taxa que o irá dirimir em 50% (STAN, 2015). Uma métrica de valoração ambiental baseada na presença ou ausência de espécies comuns, endêmicas ou ameaçadas (distintamente avaliadas) também foi utilizada metodologicamente para descrever as perdas monetárias acumuladas com a degradação dos biomas, sendo para o Cerrado em mais de \$120 milhões USD. Stan et al. (2015)

também quantifica que se houvesse cobrança em impostos para a biodiversidade a receita agrícola seria prejudicada em apenas 5% até 2023.

Na região do Matopiba, Aguiar (2016) estabeleceu um modelo de gestão dos usos e ocupações a fim de gerir as áreas de desmatamento em três possibilidades prospectivas, uma otimista considerando a aplicação da Lei Federal já citada nº 9985/2000 de implantação das Unidades de Conservação, um tendencial e outro cenário pessimista. Foram registrados aumentos excessivos e alarmantes do desmatamento em taxas de 14,0 %, 21,0 % e 21,7% para os respectivos cenários. Este estudo indicou, por intermédio de análises secundárias, que o principal fator de degradação está no prolongamento das cadeias de *commodities* agrícolas, dentre elas essencialmente a cultura da soja (AGUIAR, 2016).

Ainda em Minas Gerais, Macedo et al. (2013) desenvolveram o estudo sobre a expansão canavieira no Estado. Os autores perceberam que as variáveis de maior peso de evidências para o fenômeno transicional de crescimento da cultura de cana de açúcar é a declividade e a distância em relação aos cursos d'água, o que é perfeitamente justificável dadas as suas propriedades morfológicas e exigências edafoclimáticas que permitem seu cultivo em regiões onde não há necessidade de sistemas de irrigação. Sendo que estas duas são mais influenciadoras nesta transição (a expansão agrícola canavieira) do que os demais fatores que refletem a logística industrial (distância dos acessos viários e dentre outros atributos). O que ressalta em parte que os conhecimentos biológicos do cultivar são determinantes na escolha dos fatores calibrados e em consequência para o sucesso do modelo (MACEDO et al., 2013).

Um estudo de expansão canavieira efetuado por Ribeiro, Ferreira e Ferreira (2016) para todo o Cerrado brasileiro desconsiderou alguns destes últimos critérios, de distâncias dos reservatórios hídricos naturais e zoneamento agroecológico e/ou agroclimático da cana de açúcar, considerando somente variáveis de industrialização do sistema de produção. As estimativas de expansão atestaram a possibilidade de que muitos municípios venham a aderir a monocultura da cana de açúcar e que o acréscimo de área plantada seria de 500% até 2035 no referido bioma. Para o avanço da fronteira agrícola de cana de açúcar também se destacam os trabalhos de Fushita; Santos (2015) na bacia hidrográfica do rio Mogi, em São Paulo e Pisani; Demarchi; Riedel (2016) para a sub bacia do rio Capivara, Botucatu, São Paulo (2016).

### 3.7 - O cultivo da soja e as Unidades de Conservação no Tocantins

Aproximadamente 31% do Estado do Tocantins é protegido por Unidades de Conservação, dentre elas destacam-se as Áreas de Proteção Ambiental (APA), de domínios federais, estaduais e municipais, os Parques Estaduais e Nacionais, as Reservas do Patrimônio Natural, dentre outras. Ao todo são trinta e três UCs, sendo que seis são de domínio federal, treze estaduais, quatro municipais, e dez particulares.

O Quadro 2 elenca as principais áreas demarcadas expostas segundo sua extensão em área. Pressupõe-se que as mesmas foram criadas pelo poder público de modo a preservar a biodiversidade regional segundo critérios deferidos pela Lei nº 4.519, de 18 de Julho de 2000, que as asseguram conceitualmente nesta forma, em limitações fisiográficas fundamentais para conservação do equilíbrio ecológico em conformidade com os objetivos do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza - SNUC.

Quadro 2 - Unidades de Conservação localizadas no Estado do Tocantins, com maior percentual em área

Unidade de Conservação	Administração	Situação	Marco Regulatório	Área (Km <sup>2</sup> )
APA Ilha do Bananal/Cantão	Estadual	APA instalada	Lei 907 de 20.05.1997	15683.19
Estação Ecológica da Serra Geral do Tocantins	Federal	Estação Ecológica instalada	Decreto de 27.07.2001	6351.6812
Parque Nacional do Araguaia	Federal	Parque Nacional instalado	Dec.47.570(31.12.1959)	5551.73
Interflúvio Tocantins-Paraná	Estadual	Área prioritária para implantação de UC de proteção integral	Inexistente	3825.43
Parque Estadual do Jalapão	Estadual	Parque Nacional instalado	Lei nº 1.203, de 12 de janeiro de 2001.	1597.26
Área de Proteção Ambiental Jalapão	Estadual	APA instalada	Lei nº 1.172 de 31 de Julho de 2000	1356.54

Fonte: Secretaria do Planejamento do Estado (Seplan, 2012)

A APA da Ilha do Bananal/Cantão é delimitada espacialmente segundo o artigo 1º da Lei Estadual nº 907 de 20 de maio de 1997. Logo no parágrafo único deste mesmo artigo, a APA tem seu objetivo enunciado estritamente na proteção da qualidade das águas sub e superficiais pertencentes a mesma. Esta Unidade de Conservação está sob a jurisdição, poder de fiscalização, administração e supervisão, do Instituto de Natureza do Tocantins (Naturatins), que tem autoridade de usufruir de todos os instrumentos financeiros e legais cabíveis (por intermédio de convênios e etc) para manutenção dos objetivos da APA.

Este mesmo órgão poderá licenciar, por intermédio de autorização que obrigatoriamente exigirá estudos de impacto ambiental da atividade a ser praticada, ou proibir todo empreendimento que configure riscos às objetivações citadas. Explicita-se o inciso sétimo do parágrafo 2º que coíbe as ações de desmatamento de regiões com vestígios de vegetação primitiva nos entornos desta unidade. A mesma Lei ainda elenca a Secretaria do Planejamento do Estado do Tocantins e o Conselho Co-Gestão da APA para definição do zoneamento da APA, parte integrante e essencial de seu plano de manejo que territorialmente dividi as ações a serem implantadas e permitidas em zonas estratégicas.

Embora existam restrições detalhadas acima para esta UC, a APA da Ilha do Bananal/Cantão foi relatada por Moreira; Collicchio (2017) com alto percentual de desmatamento, por intermédio de dados secundários. Os mesmos autores perceberam que estas ações de largo impacto na finalidade da UC de proteção da sua biodiversidade natural acompanharam os crescimentos em área plantada de soja para esta mesma região, por intermédio de dados de expansão municipal do IBGE. Estima-se que estas expansões historicamente foram acima do crescimento médio nacional, o que sugere possível flexibilização de uso destas terras por meio de medidas legais para fins de emitir concessões aos produtores nesta região ao longo dos anos analisados.

O mesmo foi realizado por Gamba; Collicchio (2018) para o mosaico de Unidades de Conservação do Jalapão e em seu entorno, onde localiza-se o segundo centro produtor municipal do Tocantins, a região de Mateiros. Estes autores encontraram valores expressivos de área plantada e de taxas de crescimento da cultura por meio de dados do IBGE.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A. S. **Modelagem da dinâmica do desmatamento na região do Matopiba até 2050**. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

ANJOS, J. C. R.; JÚNIOR, A. S. A.; BASTOS, E. A.; NOLETO, D. H.; MELO, F. B.; BRITO, R. R. Armazenamento de água em Plintossolo Argilúvico cultivado com cana de açúcar sob níveis de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 6, p. 464-473, 2017.

BRANDELERO, E. M.; PEIXOTO, C. P.; RALISCH, R. Nodulação de cultivares de soja e seus efeitos no rendimento de grãos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 30, n. 3, p.581-588, 2009. DOI: 10.5433/1679-0359.2009v30n3p581.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Política Agrícola. **Portaria n.67, de 11 de julho de 2019**. Diário Oficial da União, n. 138, Seção1, p. 66, de 11 de julho de 2019.

BRUNING, J.; ROBAINA, A. D.; TAPAHUASCO, W. F. C.; PEITER, M. X.; BOSCAINI, R.; CHAIBEN NETO, M. Caracterização físico-hídrica de solos cultivados com arroz na região de Alegrete - RS. In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 9., 2017, Santana do Livramento. **Anais...** Bagé, RS: Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA, 2017. p. 1-5.

CAGLIARI, J.; VERONEZ, M. R.; ALVES, M. E. Remaining phosphorus estimated by pedostransfer function. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n.1, p. 203-212, 2011.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica sobre evapotranspiração potencial. **Revista Bragantia**. v. 2, n. 59, p. 125-137, 2000.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Teste de uma equação simples da evapo(transpi)ração potencial baseada na radiação solar extraterrestre e na temperatura média do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3., 1983, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargil, 1983. p. 229-244.

CORDEIRO, F.R.; CESÁRIO, F. V.; FONTAN, A. A.; ANJOS, L. H. C.; CANTO, A. C.B.; TEIXEIRA, W.G. Pedotransfer functions: the role of soil chemical properties units conversion for soil classification. **Rev Bras Cienc Solo**, v. 44, e0190086, p. 1-16, 2020.

COSTA, C. D. O; ALVES M. C; SOUSA A. P. Armazenamento de água em dois solos sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v. 9, n. 3, p. 446-459, 2001.

CUNHA, G. R. et al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v.41 e 42, p. 66-73. 2018.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Roma: FAO, 1975. 143 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja**: região central do Brasil 2012 e 2013. Londrina: Embrapa Soja, 2011. (Sistemas de Produção, 15). Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/904487/tecnologias-deproducao-de-soja---regiao-central-do-brasil-2012-e-2013>>. Acesso em: 27 dez. 2019

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional (BEN) 2019**: ano base 2018. Rio de Janeiro: EPE. 2019. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em jan/2020.

FIETZ, C. R.; URCHEI, M. A. Deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.262-265, 2002.

FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; TOSTES, R. Propriedades físicas e matéria orgânica de um latossolo vermelho sob sistemas de manejo e cerrado nativo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.24, n.3, p.24-30, jul./set. 2008.

FUSHITA, A. T.; SANTOS, J. E. Modelagem da dinâmica de usos da terra na bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu (SP). In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa, PB. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 215-222.

FARIAS B. R. J.; NEPOMUCENO L. A.; NEUMAIER N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9p.

FREITAS, L. A. et al. Soil physical and phenological attributes of soybean in different management systems and gypsum. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 12, n. 4, p.508-515, set. 2017.

GAMBA, F. B.; COLLICCHIO, E. Cultivo da soja em áreas de entorno do Mosaico das Unidades de Conservação do Jalapão, na região do Matopiba. **Revista Liberato**. v. 19, n. 32, p. 179-190, out. 2018.

GAVA, R.; LIMA, S. F. D.; SANTOS, O. F. D.; ANSELMO, J. L.; COTRIM, M. F.; KÜHN, I. E. Water depths for different soybean cultivars in center pivot. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 10-15, 2018.

GOMES, S. **Ajuste e avaliação de um modelo de balanço hídrico decendial e estudo dos limites de sua utilização em algumas localidades no Estado do Paraná**. 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, 2020**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>>. Acesso em: 26 jul. 2020.

IBGE. **Produção agrícola municipal, culturas temporárias e permanentes, 2018**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 06 dez. 2019.

IPCC. **IPCC, 2014**: sumário para os tomadores de decisão do quinto relatório de avaliação (2014). Traduzido por Iniciativa Verde, São Paulo, 2015. Disponível em: [http://www.iniciativaverde.org.br/lib/php/download.php?cfg=1&arq=produtos/37\\_2015\\_05\\_04\\_relatorio\\_ipcc\\_portugues.pdf&mde=ProdItem&cod=37](http://www.iniciativaverde.org.br/lib/php/download.php?cfg=1&arq=produtos/37_2015_05_04_relatorio_ipcc_portugues.pdf&mde=ProdItem&cod=37). Acesso em: 04 abr. 2019.

KEMERICH, P. D. C. et al. Evaluation of soil physical indices under different uses in river basin. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v.41 e 42, p. 66-73. 2018.

KHALEDIAN, Y; QUINTON, J. N.; BREVIK, E. C.; PEREIRA, P.; ZERAATPISHEH, M. et al. Developing global pedotransfer functions to estimate available soil phosphorus. **Science of the Total Environment**, v. 644, n. 1, p. 1110–1116, 2018.

LACHER, I. L. et al. Scale-dependent impacts of urban and agricultural land use on nutrients, sediment, and runoff. **Science of the Total Environment**, Virginia, p.611-622, set. 2018.

LEIJA-LOREDO, E. G. et al. Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros em la región costera del estado de Oaxaca, México. **Madera y Bosques**, João Pessoa, v. 22, n. 1, p.125-140, set. 2016.

LIMA, A. M. N. et al. Efeito do déficit hídrico e época de semeadura sobre os teores e rendimentos de óleo e proteína em cultivares de soja no Tocantins. **Revista de La Facultad de Agronomía**, La Plata, v. 116, n. 2, p.193-199, jun. 2017.

LIMA, A. M. N.; PELUZIO, J. M.; SOUSA, J. P. Estresse ambiental na cultura da soja. **Revista Integralização Universitária**, Palmas, v. 12, n. 16, p.71-80, jun. 2017.

LOPES, A. L. C. **Cultivo e manejo da soja**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. out. 2013. 37 p.

MACEDO, R. C. et al. Modelagem dinâmica espacial das alterações de cobertura e uso da terra relacionadas à expansão canavieira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 19, n. 2, p.313-337, jun. 2013.

MARTINS, E. C. A.; PELUZIO, J. M.; OLIVEIRA JUNIOR, W. P. de; TSAI, S. M.; NAVARRETE, A. A.; MORAIS, P. B. de. Alterações dos atributos físico-químicos da camada superficial do solo em resposta à agricultura com soja na várzea do Tocantins. **Biota Amazônia**, v. 5, n. 4, p. 56-62, 2015.

MAS, J. F. et al. Inductive pattern-based land use/cover change models: a comparison of four software packages. **Environmental Modelling & Software**, v. 51, p.94-111, jan. 2015.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 107, p. 55-70, 2002.

MORANDO, R.; SILVA, A. O.; CARVALHO, L. C.; PINHEIRO, M. Déficit hídrico: efeito sobre a cultura da soja. *Journal of Agronomic Sciences*, Umuarama, v. 3, n. especial, p. 114-129, 2014.

MOREIRA, D. C.; COLLICCHIO, E. Prerrogativas da legislação ambiental estadual em relação à APA Ilha do Bananal/Cantão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 18, p. 197-211, 2017.

OLORUNFEMI, I. E.; FASINMIRIN, J. T.; OJO, A. S. Modeling cation exchange capacity and soil water holding capacity from basic soil properties. **Eurasian J Soil Sci**, v. 5, n. 4, p. 266-274, 2016.

PEQUENO, P. L. L. et al. Uso de funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em um Latosso no estado de Rondônia. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 14, n. 2, p.229-239, dez. 2018.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C.; **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Livraria e Ed. Agropecuária, 2002. 478p.

PIERDONÁ, F. G.; BERNARDES, F. S.; NOGUEIRA, A. P. O.; HAMAWAKI, O. T.; SANTANA, T. P.; MORAES, N. L. A.; BORGES, B. A. M.; MARTIN, J. A. Distingüibilidade de genótipos de soja com caracteres da fase vegetativa. In: Curso de Inverno de Genética, 14., 2018, Jaboticabal. **Anais de Ciência & Tecnologia**. Jaboticabal: Fatec-JB, 2018. p. 1-5.

PISANI, R. J.; DEMARCHI, J. C.; RIEDEL, P. S. Simulação de cenário prospectivo de mudanças no uso e cobertura da terra na sub-bacia do rio Capivara, Botucatu - SP, por meio de modelagem espacial dinâmica. **Rev. Cerrados**, Montes Claros, v. 14, n. 2, p.3-29, dez. 2016.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Salesward-discovery, 2015. 474p.

RIBEIRO, N. V.; FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C. Avaliação da expansão do cultivo da cana de açúcar no bioma cerrado por meio de modelagem dinâmica da paisagem. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 1, n. 68, 2016.

SANTOS, L. J. M.; RIBEIRO, M, S. Métrica proposta para valoração de áreas ambientais. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 10, n. 4, p.1133-1159, dez. 2017.

SILVA, R. A. **Impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade e pegada hídrica da soja cultivada na região do Matopiba**. 2018. 113 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2018.

SOUZA, E. D.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BATJES, N. H.; SANTOS, G. R. D.; & PONTES, L. M. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin, **Scientia Agricola**, v. 73, n. 6, p. 525-534, 2016.

SCHIAVO, J. A.; ROSSET, J. S.; PEREIRA, M. G.; SALTON, J.C. Índice de manejo de carbono e atributos químicos de Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n. 10, p. 1332-1338, 2011.

SECRETARIA DO PLANEJAMENTO DO ESTADO DO TOCANTINS (SEPLAN). **Base de dados geográficos do Tocantins - atualização 2012**. Palmas: Seplan, 2012 (Base de Dados Geográficos).

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.97, n.5, p.635-644, 2010.

STAN, K. et al. Simulating deforestation in Minas Gerais, Brazil, under changing government policies and socioeconomic conditions. **Plos One**, v. 10, n. 9, p.1-19, ago. 2015. doi: 10.1371/journal.pone.0137911

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 44, p. 892-898, 1980.

THORNTHWAITE, C.W. Na approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 26, p. 55-94, 1948.

USDAa – United States Department of Agriculture. **Table 42**. World vegetable oils supply and distribution. Disponível em: <<https://www.ers.usda.gov/>>. Acesso em: 08 fev. 2020.

USDAb – United States Department of Agriculture. **Oilseeds: world markets and trade**. v.33, p.15-16, 2020. (USDA Foreign Agricultural Service: Circular Series)

ZANON, A. J.; SILVA, M. R.; TAGLIAPIETRA, E. L.; CERA, J. C.; BEXAIRA, K. P.; RICHTER, G. L.; DUARTE, A. J.; ROCHA, T. S. M.; WEBER, P. S.; STRECK, N. A. **Ecofisiologia da soja visando altas produtividades**. Santa Maria: Palloti/SM. v. 1. 2018. 136p.

#### 4 - ESPACIALIZAÇÃO DA CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL NO ESTADO DO TOCANTINS POR MEIO DE EQUAÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA

##### Resumo

A demanda por alimentos e pela diversificação energética remodela o ordenamento territorial, seja pela expansão urbana e industrial e/ou pela adição ou desenvolvimento de sistemas produtivos. A gestão adequada dos recursos naturais consegue estabelecer as zonas prováveis onde as produtividades economicamente viáveis de uma gama de culturas sejam atingíveis. A soja é uma cultura agroenergética com destaque no panorama da energia sustentável do país. Não tão diferente do contexto nacional, esta oleaginosa tem sido registrada em significativas taxas de acréscimo de área no Estado do Tocantins. Deste modo, as políticas privadas ou públicas de investimentos setoriais necessitam de parâmetros físico hídricos que fundamentam os riscos financeiros de suas atividades. Estes parâmetros são pouco acessíveis e de difícil determinação, pelos preços que são definidos para sua experimentação e pela quantidade de amostras necessárias para representar uma unidade federativa. Um dos indicadores retratados é a Capacidade de Água Disponível (CAD) do solo, uma variável física e biológica que serve de consideração para estimativa da disponibilidade hídrica da cultura por meio de simulações de balanço hídrico climatológico. Com isto, o presente trabalho teve o objetivo de espacializar a CAD no Estado do Tocantins, a partir de uma função de pedotransferência, avaliando a disponibilidade hídrica dos solos nas Unidades de Conservação e em seus entornos. Primeiramente adaptou-se a rotina algorítmica, traduzindo-a em Python, do Qualisolo, otimizando-o de modo a realizar o método de Arya; Paris (1981) para várias amostras de um banco de dados de planilhas eletrônicas. Esta metodologia necessita das frações granulométricas de uma amostra indeformável de solo, bem como de sua densidade aparente e global. Foram identificados 157 pontos da Embrapa que possuem todas estas características ao longo do Matopiba. Entretanto os valores de densidade inexistem no restante das observações coletadas, que dizem respeito apenas aos aspectos texturais mencionados. Estas informações juntas somam 333 parcelas de dados de física dos solos. Ponderou-se assim em construir funções de pedotransferência que descrevam a Disponibilidade Hídrica Total em função apenas dos percentuais de argila, areia, silte e carbono orgânico total. Algumas medidas de tendências de erro e teste t de Student foram aplicados para validar a equação pretendida. Os autores optaram pela utilização da equação  $DTA=3,2993-0,0028.AT+0,0034.AG$ , para mapeamento da CAD. Esta foi construída como o produto da água disponível (AD) pela profundidade efetiva da raiz de 50 cm, para a cultura da soja. As conclusões refletem quantidades de AD estratégicas para a agroindústria da soja próximas a Área de Proteção Ambiental da Ilha do Bananal/Cantão e expõe fragilidades para cultura em sequeiro em outros dois grandes produtores, os municípios de Campos Lindos e Mateiros.

**Palavras chave:** disponibilidade hídrica; riscos climáticos; produtividade, modelagem, otimização; Unidades de Conservação

## 4.1 - Introdução

As cadeias produtivas tendem a se adaptarem a exigências crescentes por recursos energéticos que inevitavelmente implicam na ampliação de seus sistemas produtivos de forma sustentável. Um dos critérios esperados para esta expansão rural está na procura por compartimentos ambientais que parametrizam condições climáticas naturais de baixo risco ou fatores físicos favoráveis ao seu desempenho produtivo (SANTOS; MARTINS, 2016).

O surgimento de vários segmentos agroindustriais, formados em razão destas novas perspectivas de crescimento de demandas, requer tecnologias economicamente aceitáveis e instrumentações alternativas para a previsibilidade, monitoramento ou readequação permanente de suas eficiências (CASTRO et al., 2001).

Dentre estas organizações sistêmicas destaca-se a sojicultura, cultura energética de maior predominância mercadológica em virtude da fabricação de biodiesel, bem como de cosméticos, alimentos e adubos, da nutrição animal e de outras várias destinações industriais (LEMOS et al., 2017).

O Estado do Tocantins, parte integrante do Matopiba, com logística e infraestrutura voltadas à formação e consolidação de pólos agropecuários, tem se situado como o sétimo maior produtor de soja das unidades federativas. O Tocantins produz 2,5% do que é produzido nacionalmente em toneladas de grãos, caracterizando-se como a décima maior rentabilidade nesta esfera da economia no Brasil. O Estado do Mato Grosso é a principal potência neste ramo, representando 29,0% da lucratividade desta oleaginosa. (IBGE, 2020).

A produção dos grãos da soja, em seu estágio reprodutivo, de florescimento a enchimento dos grãos, é altamente depende da disponibilidade hídrica do solo. Estima-se que variações neste parâmetro, em especial para esta fase fenológica, induzem flutuações proporcionais nos rendimentos em diferentes anos safras e regionalidades (MORANDO et al., 2014). Um cultivar de soja mesmo desprovido de técnicas de manejo apropriadas, como irrigação e planejamento das épocas de semeadura, no enfrentamento de condições naturais de deficiência hídrica deve sobreviver. Todavia isto pode afetar alguns aspectos fisiológicos da planta, como seus índices de área foliar, e por fim o metabolismo e desempenho fotossintético pela desidratação dos citoplasmas e consequente fechamento de células estomáticas encurtando seus ciclos de vida (ZANON et al., 2018). Fatores estes que agravam veementemente a produtividade esperada. A qualidade do grão, diferença entre os teores de óleo e proteína, também pode ser agredida por esta variação de água disponível o que não é de interesse

industrial no panorama atual da crescente geração de biocombustíveis e para a segurança alimentar (LIMA et al., 2017).

Com a intenção de identificar geograficamente os riscos de disponibilidade hídrica para as produtividades das lavouras de soja na república federativa do Brasil, o Ministério de Agricultura e Pecuária instituiu para cada estado uma portaria específica dos critérios mínimos e os resultados do zoneamento estadual. Para obtenção deste indicador de risco climático regional, deve-se ter como entrada do balanço hídrico desta cultura as precipitações e evapotranspirações potenciais médias diárias de no mínimo 15 anos de um conjunto de estações representativas desta territorialidade, os seus coeficientes de cultivo, os ciclos de vida da planta (diferenciado em grupos de maturidade), datas de semeadura e a estimativa da capacidade de água disponível (CAD) do solo (BRASIL, 2019). Esta última normalmente é fixada em função de classes texturais, não sendo dimensionada espacialmente.

A CAD, entretanto, pode ser estimada por meio das curvas de retenção de água no solo (CRA). As CRAs correlacionam as tensões matriciais de uma amostra indeformada com suas respectivas umidades (PREVEDELLO, 2015). Existem duas possibilidades para sua obtenção usualmente aceitas. Os métodos indiretos e diretos. Contudo verifica-se que a metodologia de processamento laboratorial por intermédio de uma mesa de tensões consorciada com uma câmara de Richards, método direto, é por vezes de extrema trabalhabilidade especialmente na quantificação dos pontos de murcha permanente de várias amostras, quantidade esta proporcional à extensão e um zoneamento de risco climático estadual (SOUZA; BORGES JÚNIOR; VIANA, 2017).

Esta problematização advinda da morosidade de tratamento das informações fundamentais à eficiência agrícola e da dificuldade dos planos de amostragem direta de água disponível em áreas extensas leva a consideração das chamadas equações ou funções de pedotransferência (FPT). As últimas são vistas como estratégias de otimização dos trabalhos de manejo em campo no que se refere ao cálculo das curvas de retenção e outros parâmetros de difícil experimentação. Também são assim utilizadas quando se vislumbra uma inviabilidade no custo de execução laboratorial, contratação de profissionais habilitados e equipamentos especializados, ou curto prazo estabelecido para determinação da CRA (MINASNY; MCBRATNEY, 2002).

O presente trabalho reconhece os poucos registros técnicos estaduais, oficiais e de fácil acesso público da totalidade de características físicas dos solos na região do Matopiba para a contemplação da curva de retenção de água. Assim como também verifica a ausência de outros atributos hidráulicos derivados desta modelagem, como a disponibilidade total de água (DTA).

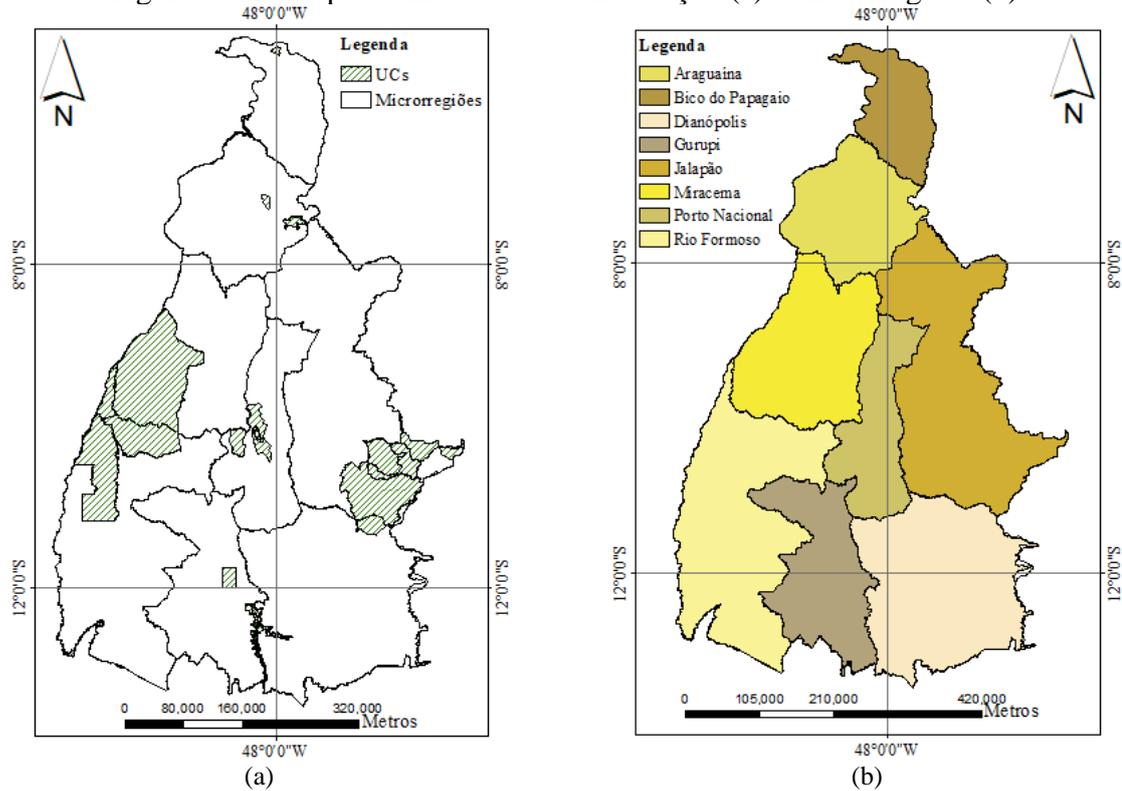
Para tanto objetivou-se a espacialização da CAD no Estado do Tocantins a partir de uma função de pedotransferência que correlacionou a DTA calculada com as frações de argila, silte e areia existentes no Matopiba. O Tocantins, em maioria de seus municípios, somente usufrui de ensaios físicos incompletos, portando apenas destas distribuições texturais na plataforma de dados sobre a qualidade física dos solos no Brasil da Embrapa.

#### **4.2 - Material e métodos**

A área de estudo é a unidade federativa do Tocantins, que se localiza a sudeste da grande região Norte do país, definido entre as latitudes 05° 10' e 06'' e 13° 27' e 69'' e longitudes 45° 41' 46'' e 50° 44' 33''. Segundo o levantamento pedológico disponibilizado pela base de atualização da Secretaria de Planejamento do Estado – Seplan (TOCANTINS, 2012), o Estado do Tocantins possui em maior parte Plintossolos, que são conceitualmente conhecidos como de precária drenagem subsuperficial, abrangendo 35 % de seu território. Em contrapartida segundo a mesma fonte 20% de seu espaço é de Latossolos, bem drenados, o que pode permitir sua maior retenção de água.

Conforme diagnosticado por Collicchio et al. (2015) as temperaturas mais altas coincidem com os meses mais secos em torno de 27,1 °C e as mais baixas são de 24,7 °C em junho. O Estado do Tocantins, suas principais Unidades de Conservação, e suas microrregiões, são ilustradas pela Figura 6.

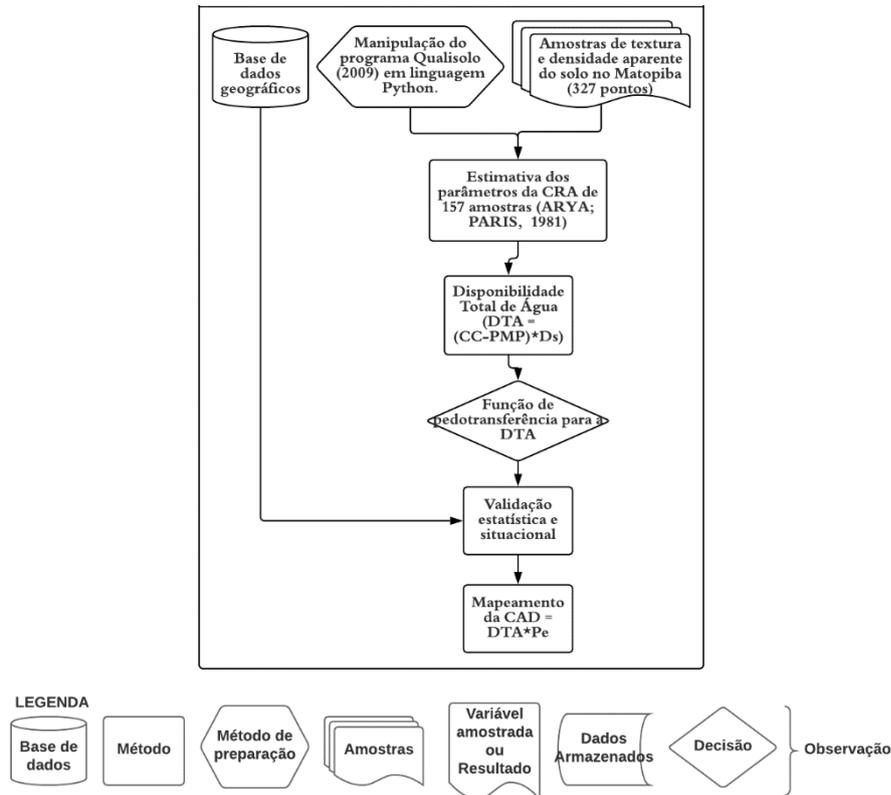
Figura 6 – Principais Unidades de Conservação (a) e microrregiões (b)



O fluxograma do procedimento metodológico para caracterização e obtenção do mapa da CAD no Estado do Tocantins está apresentado na Figura 7.

Todos os dados de entrada, compilados pelos símbolos que definem a base de dados e as amostras, foram extraídos de fontes externas para definição deste produto. A etapa de manipulação do programa Qualisolo (2009) e da montagem da função de pedotransferência (FPT) contínua servirão respectivamente para a otimização de futuros trabalhos dedicados à valoração *ex situ* de propriedades hidráulicas e para a rápida estimativa de baixo custo da CAD a partir de ensaios de textura do solo para diferentes culturas em pedologias particulares do Cerrado.

Figura 7 – Fluxograma da metodologia adotada para obtenção do mapa da CAD no Estado do Tocantins



Inicialmente foi retrabalhado o código fonte do programa Qualisolo desenvolvido pela Embrapa e disponível para a comunidade científica. O programa teve suas funções de cálculo principais transferidas para a linguagem Python, sendo originalmente elaborado em Java Script. Sua interface não foi aproveitada para esta discussão, apenas o seu método de ajuste da curva de retenção de água no solo (CRA) de van Genuchten (1980) por uma rotina iterativa, o método de ARYA; PARIS (1981).

O intuito desta fase foi a otimização do programa para processamento de várias amostras de solo, que devem contemplar alguns aspectos texturais e estruturais conhecidos, as frações acumuladas de areia, silte e argila, e as densidades de partículas e global do solo. Para cada uma destas entradas dispostas em um ambiente de planilha, encontra-se como resultados da rotina algorítmica referida os seguintes parâmetros da CRA de van Genuchten:  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $\theta_r$  e  $\theta_s$ , conforme apresentados na equação 5 (BRUNING et al., 2019).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\varphi_m|^n)]^m} \quad (5)$$

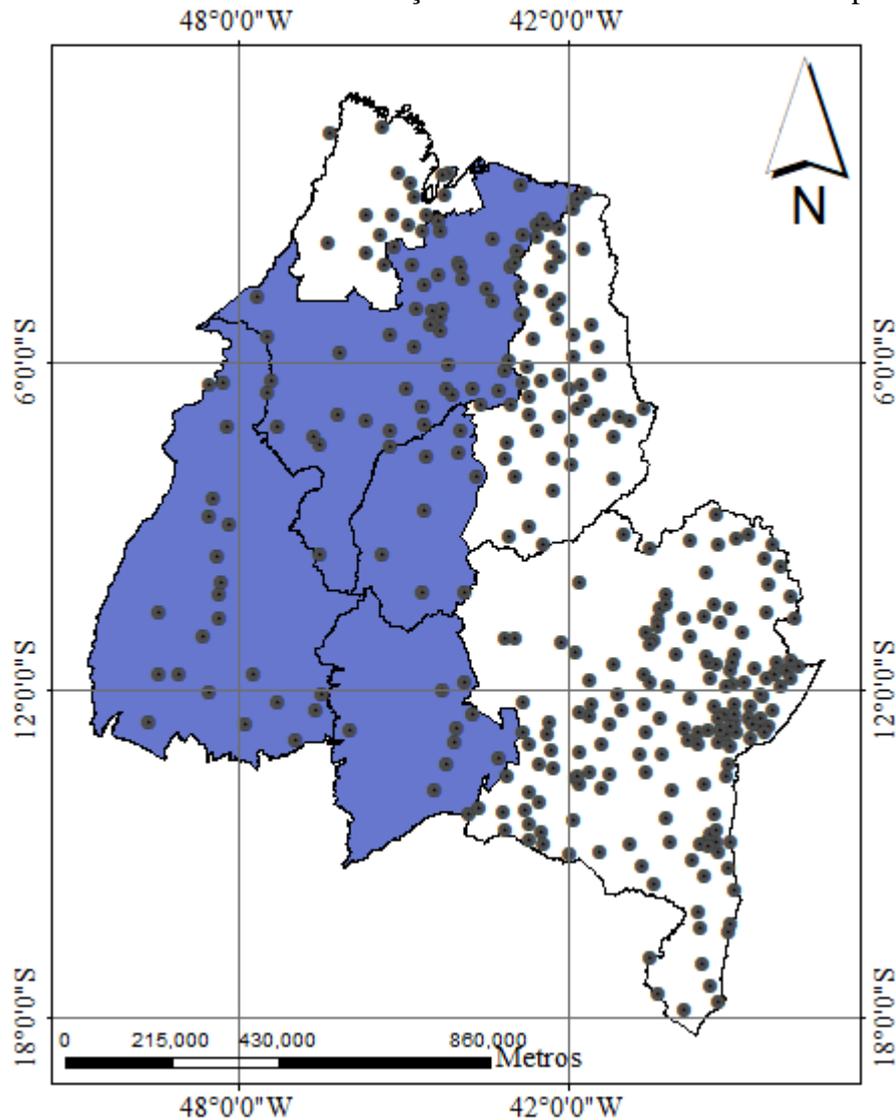
Onde:  $\alpha, n, m$  são parâmetros de forma da CRA;  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são as umidades residual e de saturação em  $m^3.m^{-3}$  e  $\varphi_m$  é a variável independente de tensão matricial em hPa.

Em seguida foi organizado um banco de dados secundários, entre os quais pode-se citar os elementos geométricos para geolocalização das regiões, microrregiões e limites municipais, os levantamentos pedológicos para retratação da confiabilidade dos resultados físicos a serem localmente considerados adequados, de maior disponibilidade total de água e dentre outros adquiridos da Seplan (TOCANTINS, 2012). Também serviu de variável de comparação o raster das precipitações médias mensais extraídas de 110 estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) trabalhadas por Collicchio et al. (2015). O Sistema de Informações Geográficas, Quantum GIS, foi utilizado para manipulação destas informações geográficas.

Para este banco de dados também foram acrescentados dados numéricos da plataforma Sidra do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), referentes a produção agrícola municipal de todos os municípios do Tocantins. Os informativos adquiridos dizem respeito à área colhida em hectares e a quantidade produzida em toneladas dos cultivares soja por município (IBGE, 2017). Foram associadas algumas entidades políticas administrativas de dominância neste sistema produtivo com os caracteres físico hídricos a serem valorados.

Por meio de plataforma do Sistema de Informação de Solos Brasileiros da Embrapa foram coletados dados granulométricos de 327 pontos ao longo do território do Matopiba. Sendo considerado no presente texto pois se trata de uma unidade de planejamento agrícola que compõe integralmente o Estado do Tocantins. Este inventário granulométrico, Figura 8, detém os valores dos atributos físico hídricos: as frações de areia, argila e silte, que são retidas nos peneiramentos das amostras de solo indeformáveis.

Figura 8 – Amostras granulométricas nos Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia do Sistema de Informação de Solos Brasileiros da Embrapa



Destes experimentos, 157 possuem dados de densidade aparente do solo, que contém o volume dos poros em sua determinação, e de densidade de partículas, que desconsidera os vazios referidos. Estes últimos dados foram processados pela rotina numérica do Qualisolo, que modelou os coeficientes das curvas de retenção para cada um dos mesmos segundo a equação 5 de van Genuchten.

Afim de se obter um diagnóstico das umidades volumétricas nas capacidades de campo (CC) e nos pontos de murcha permanente (PMP), necessários para a quantificação da disponibilidade total de água, segundo a equação 6, substituiu-se nos modelos destas parcelas experimentais as tensões mátricas comumente empregadas para solos de textura arenosa (de maior predominância neste estudo de caso). Assim sendo, optou-se por uma tensão de 0,1 atm

para valorar a CC em umidade volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  de solo), e outra de 15 atm para expressar PMP (em  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  de solo) para a área estudada (GOMES, 2013).

$$\text{DTA} = (\text{CC} - \text{PMP}) \cdot \rho_s \cdot 10 \quad (6)$$

Onde: DTA é a disponibilidade de água total no solo, metricamente estabelecida em mm/cm de solo; CC é a umidade na capacidade de campo em porcentagem de volume de solo ( $\text{m}^3/\text{m}^3$  de solo); PMP é a umidade em ponto de murcha permanente, igualmente em porcentagem de volume de solo ( $\text{m}^3/\text{m}^3$  de solo) e  $\rho_s$  é a densidade do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Várias equações de pedotransferência foram testadas estatisticamente para regionalização da Disponibilidade Total de Água (DTA), ou seja, para sua averiguação nos outros 170 pontos sem densidade do solo, de diagnóstico apenas granulométrico. Com isso relacionou-se linearmente esta variável calculada nos 157 pontos com os percentuais de argila, silte e areia, bem como de carbono orgânico do solo - COS. Optou-se pela regressão que expressou melhores índices de erro médio (EM) e de raiz do erro quadrático médio (REQM), equações 7 e 8, bem como menores valores de p para teste t de Student e análise de variância entre as variáveis explicativas e a variável dependente.

$$\text{EM} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |\theta_{is} - \theta_{io}| \quad 7$$

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (\theta_{is} - \theta_{io})^2 \right]^{1/2} \quad 8$$

A partir da relação de melhor ajuste foram mapeadas a capacidade de água disponível (CAD) apenas para o Estado do Tocantins, que integralmente compõe a região do Matopiba. Vale ressaltar que a CAD equivale a DTA multiplicada pela profundidade efetiva das raízes da soja considerada neste trabalho em torno de 50 cm, média aproximada proposta por Luján (1989).

O mapa foi elaborado utilizando o interpolador Spline de Regularização de Tensões, por meio do Sistema de Informações Geográficas, o Quantum GIS.

### 4.3 - Resultados e Discussão

De acordo com os resultados obtidos, disponíveis no Apêndice A, a partir das 157 amostras coletadas pela Embrapa, observa-se pela Figura 9-a que todas essas parcelas com suas respectivas águas disponíveis foram inseridas no triângulo textural, a fim de retratar o gradiente de disponibilidade hídrica do solo, segundo seus caracteres físicos.

Percebe-se uma maior umidade em solos de caráter siltoso, sendo que os solos franco-argilosos tiveram uma DTA de aproximadamente 1,11 mm/cm com coeficiente de variação (CV) em torno de 15,14%, enquanto as parcelas com franco-argilosos siltosos obtiveram 1,53 mm/cm de solo e CV de 10,98%. Tais coeficientes são considerados pequenos para Warrick; Nielsen (1980). Todavia, para Gomes (2009) a variação do solo franco argiloso siltoso é considerada mediana. Para esta mesma característica física, Pereira et al., (2010) especulam uma DTA entre 1,2 a 1,6 mm/cm. Esta análise de variância e demais medidas de erro podem ser consultadas na Tabela 1.

A textura mais recorrente no inventário de propriedades físicas da Embrapa no Matopiba (cerca de 33,12% da amostragem) é a Franco Arenosa. Esta taxonomia teve como média de água disponível 0,86 mm/cm. Logo esta mesma classe se enquadra no limite inferior definido por Bernardo; Soares; Mantovani (2006), em que a AD oscila entre 0,9 e 1,5 em solos brasileiros. Apenas a classe temática de Areia Franca (5,1% do total de amostras) é que ilustrou uma variabilidade inaceitável. Este comportamento demonstrou que para as menores médias de DTA, os CV tornam-se relativamente maiores. Isto está em concordância com a maioria das estimativas de umidade média no solo por diversos autores (CICHOTA; LIER, 2004).

Estes resultados induziram a percepção de uma tendência de aumento linear da DTA em direção às classes pedológicas com mais concentrações de silte. Isto é demonstrado pela Figura 9-b, onde as isoietas de lâminas d'água (mm) por centímetro de solo cresceram na direção do vértice à direita do triângulo textural, que representa os teores de silte. Andrade; Stone (2011) encontraram correlação positiva entre a capacidade de campo e as variáveis de silte e argila, o que confirma a possibilidade desta representação gráfica.

Figura 9 – Triângulos texturais das 157 amostras coletadas pela Embrapa (a) e do gradiente de água disponível no solo do Matopiba (b)

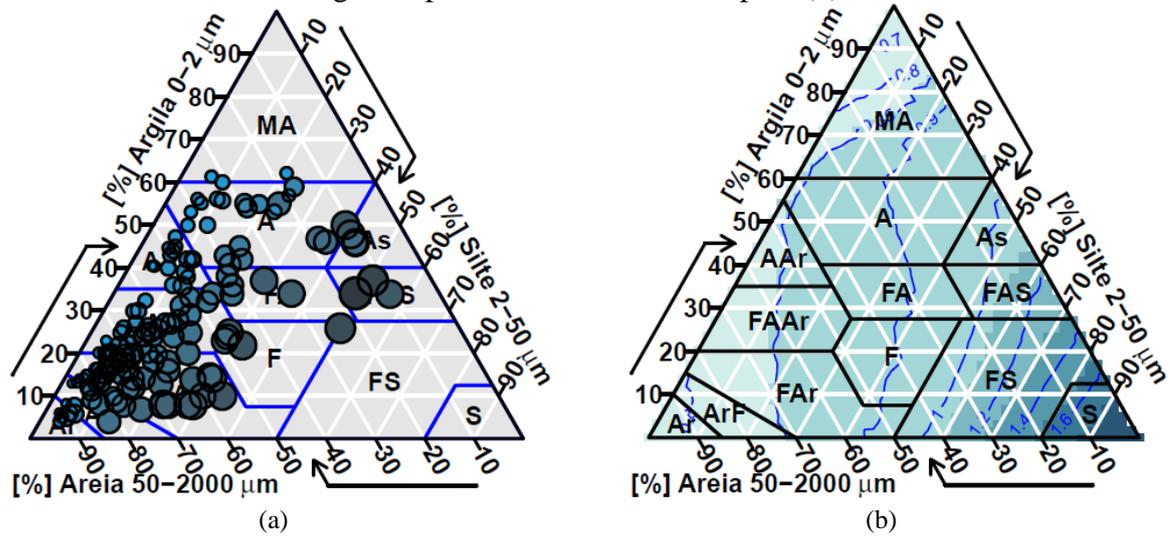


Tabela 1 – Análise de variância das 157 amostras disponibilizadas pela Embrapa na região do Matopiba.

Classe (Nome)	Classe (abrev.)	Média	CV (%)	Máximo	Mínimo
Argila	A	0,73	39,20	1,36	0,36
Argila Arenosa	AAr	0,49	30,43	0,73	0,21
Areia	Ar	0,47	43,49	0,72	0,19
Areia Franca	ArF	0,56	66,25	1,07	0,09
Argila Siltosa	As	1,28	9,96	1,37	1,14
Franco	F	1,26	8,14	1,40	1,15
Franco Argiloso	FA	1,11	15,14	1,29	0,93
Franco Argilo Arenoso	FAAr	0,73	24,83	1,08	0,21
Franco Arenoso	FAr	0,86	37,48	1,49	0,12
Franco Argilo Siltoso	FAS	1,53	10,98	1,68	1,35
Muito Argilosa	MA	0,35	2,09	0,36	0,35

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A melhor correlação obtida para espacialização da disponibilidade de água total (DTA) na região de interesse do Matopiba relacionou esta mesma variável às quantidades de areia e argila, como variáveis independentes. A análise de variância para esta variável que pôde ser convertida à Capacidade de Água Disponível (CAD) indicou uma ótima correspondência deste parâmetro com estes percentuais granulométricos observados.

A Figura 10 demonstra esta precisão estatística para a Equação A apresentada na Tabela 2. O coeficiente de ajustamento definido depõe do quão próximo estão os valores estimados dos observados, calculados pelo método de ARYA; PARIS (1981). O coeficiente de ajustamento ( $R^2$ ) foi de 80%, que juntamente com os valores de p ainda ratificaram o grau de relação entre as variáveis explicativas (concentrações de argila e areia) e a variável resposta, de

DTA, rejeitando a hipótese de nulidade da correlação em 1% de significância para as dependências relacionadas.

Figura 10 – Correlação entre os dados de DTA observados pela rotina algorítmica do Qualisolo e os estimados pela função de pedotransferência em mm/cm de solo em 157 amostras da Embrapa no Matopiba

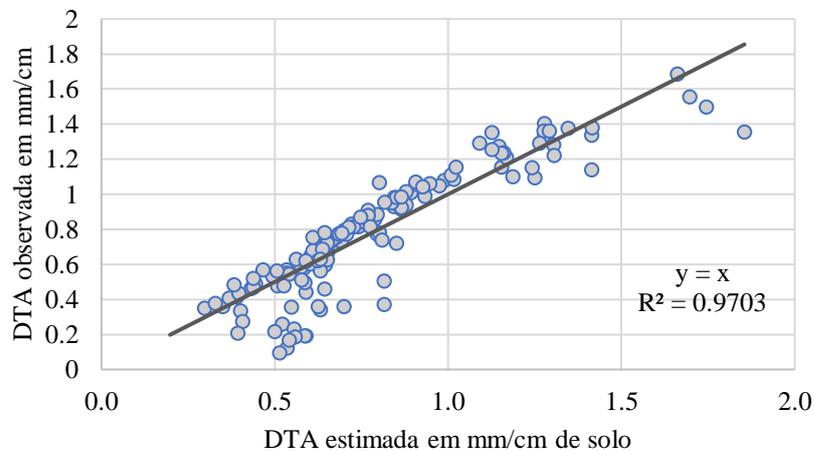


Tabela 2 – Estatística descritiva das funções de pedotransferência encontradas para o Matopiba que relacionam a Disponibilidade Total de Água (DTA) às variáveis explicativas de concentração de Areia Total (AT), Argila (AG), Silte (ST) e Carbono Orgânico (CO).

Equação	Variáveis	Coefficientes	Teste t	R <sup>2</sup>	EM	REQM
Equação A	Independente	3,2993	32.4685**	0,80	0,106	0,145
	AT	-0,0028	-24.8135**			
	AG	-0,0034	-23.0388**			
Equação B	Independente	3,2589	30.9354**	0,81	0,105	0,144
	AT	-0,0027	-24.0780**			
	AG	-0,0034	-22.3672**			
	CO	0,0019	1.4023			
Equação C	Independente	-0,1400	-2.1747*	0,80	0,106	0,145
	AT	0,0007	8.7822**			
	ST	0,0034	23.0388**			

EM: Erro médio em mm.cm<sup>-1</sup>; RMSE: Erro quadrático médio em mm.cm<sup>-1</sup>.

\*\*Significância a 1 % pelo Teste t de Student

\* Significância a 5 % pelo Teste t de Student

A equação de DTA (Equação A da Tabela 2) com argila e areia obteve um erro médio de 0,106 mm.cm<sup>-1</sup> e um erro quadrático médio (RMSE) de 0,145 mm.cm<sup>-1</sup>, e juntamente com o coeficiente de ajustamento traduziu medidas de tendência a dispersão similares às Equações B e C. Estes valores traduzem funções de pedotransferência com média acurácia, dado que R<sup>2</sup> foi menor do que 0,85, de acordo com a classificação proposta por Reichert et al. (2020).

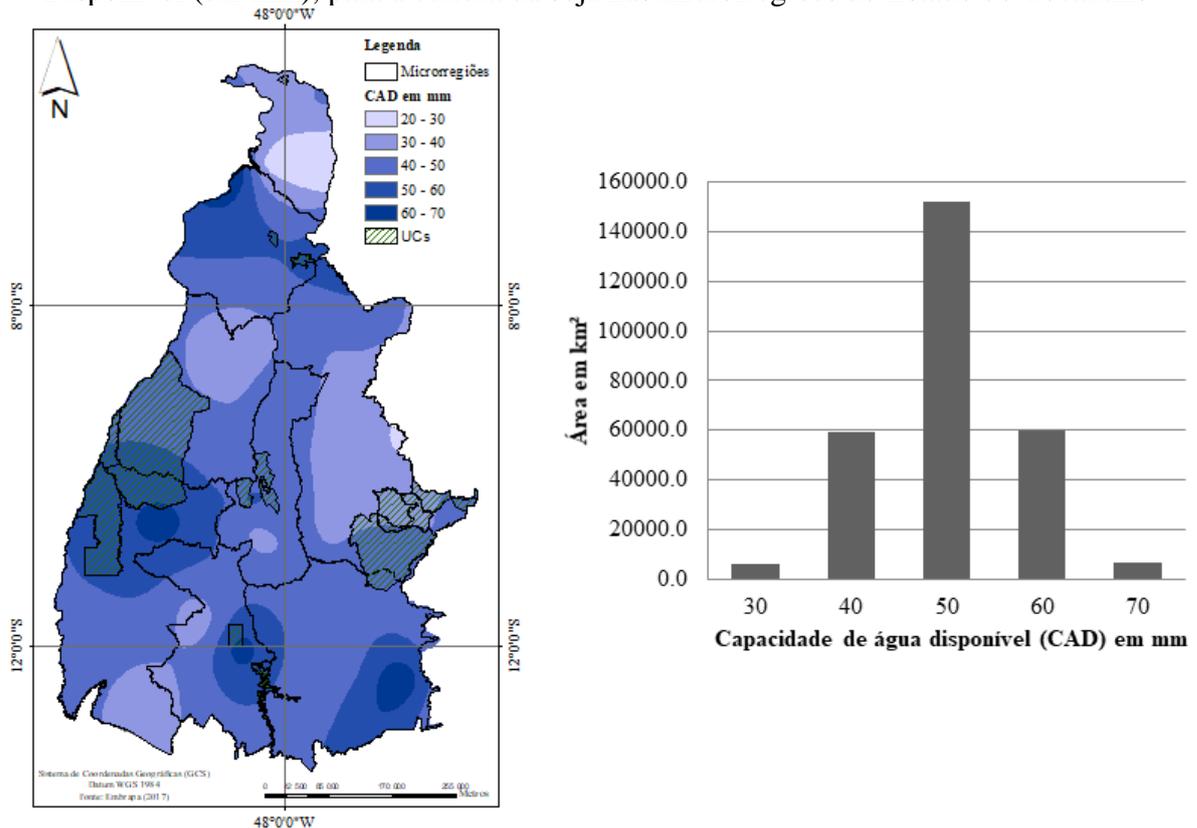
A equação B teve a vantagem de prospectar um elemento estrutural (o carbono orgânico). Contudo esta variável em discussão não correlacionou significativamente com a

disponibilidade hídrica total. Já a equação C foi construída com variáveis correlacionáveis, com coeficiente de ajustamento, REQM e EM idênticos à equação A, e poderá ser usada em análises pedológicas que envolvam a estimativa de água disponível.

O REQM (equivalente a  $0.015 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ ) está abaixo de alguns trabalhos que buscaram estimar a água disponível no solo por meio de equações paramétricas e não paramétricas, como a FPT baseada em rede neural por Haghverdi; Öztürk; Durner (2018). Estes notaram uma raiz de erro quadrático médio de  $0.033 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ , ao avaliarem como variáveis dependentes a densidade do solo, a granulometria (de maior sensibilidade na variância das informações), matéria orgânica do solo e o conteúdo de água inicial.

Mas, como já citado, a Equação A, em que  $\text{DTA}=3,2993-0,0028.\text{AT}-0,0034.\text{AG}$ , foi escolhida para o mapeamento da CAD no Estado do Tocantins (Figura 11), em contraposição às demais, em razão não somente de ter configurado maiores significâncias entre as parametrizações estudadas. A mesma foi elencada também por ser fundamentada nas dimensões de grãos mais expressivas dos solos trabalhados, a areia e a argila.

Figura 11 – Mapa e histograma da distribuição dos valores de Capacidade de Água Disponível (em mm), para a cultura da soja nas microrregiões do Estado do Tocantins



Com o mapeamento foi possível observar uma faixa de valores de CAD maiores no sudoeste do Estado do Tocantins, na microrregião do Rio Formoso, onde está situada parte da Área de Proteção Ambiental (APA) da Ilha do Bananal/Cantão, regulada pela Lei Estadual nº 907 de 20 de maio de 1997. Este indicador que fomenta a expansão da soja traduz a necessidade de implementação de políticas estratégicas de gestão territorial nestas terras, dadas suas restrições legislativas, uma vez que se constitui em boa parte de Unidade de Conservação.

Todavia esta região, segundo o levantamento pedológico disponibilizado pela Seplan (TOCANTINS, 2012), é composta por Plintossolos, que são conceitualmente conhecidos como de precária drenagem subsuperficial. Para a base de dados geoespaciais do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM, 2004), essa mesma microrregião possui em predominância Latossolos Vermelhos Amarelos de caráter plíntico e igualmente em menor proporção de Plintossolos.

Assim pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (2018) a microrregião do Rio Formoso, de horizonte plíntico, é uma região de solos de baixa percolação de águas pluviais e com alta probabilidade de baixo crescimento de massa aérea e radicular no desenvolvimento vegetativo da soja em relação a outras áreas que não possuem concreções de petroplintita (NIKKEL; LIMA, 2019). Recomenda-se, portanto, que embora sejam aqui mapeados como de maiores CAD, algumas medidas de manejo sejam adotadas nestas terras passíveis de cultivo da soja para retardar o endurecimento da plintita. Este processo é característico de Plintossolos Pétricos concrecionários, que segundo Prado (2018) é de menor armazenamento de água em comparação a outras tipologias, dada sua impermeabilidade.

Várias técnicas podem ser utilizadas para favorecer a dinâmica da água no solo, como a escarificação, afim de redefinir a estrutura do solo, sua densidade e porosidade total, conforme especificado por Freitas et al. (2017). Isto também pode ser efetuado com o controle exaustivo no uso de matéria orgânica, de um sistema de plantio direto, com calagem ou adubação fosfatada para estabilização da arquitetura de solo como o reportado por Figueiredo et al. (2008) e Anjos et al. (2017), o que justifica as produções notáveis nessa região. O trabalho de Martins et al. (2015) dissertou que estes valores gastos na aplicação de fosfato são inicialmente altos na cultura da soja, mas que são dirimidos ao longo do tempo, após oito anos de operação da estação experimental em lagoa da confusão, município pertencente à microrregião em questão.

Ademais, os solos dos cerrados são naturalmente ácidos, com presenças significativas de alumínio. Este elemento pode ser convertido em uma forma iônica pouco prejudicial ao crescimento das raízes, a partir da dosagem de gesso agrícola em horizontes de 20 a 40 cm e a acidez é corrigida pela calagem, ocasionando em ganhos de produtividade à soja (ZANDONÁ et al., 2015). Também pode ser inibido pela adição de outros componentes minerais e orgânicos,

como biofertilizantes, bactérias promotoras de crescimento de plantas, carvão vegetal, etc. (RAHMAN et al., 2018). Isto, portanto, pode promover profundidades efetivas mais satisfatórias do que a conferida nos cálculos de potencial de armazenamento realizados.

Martins et al. (2015) também constataram esta característica em solos nativos do Cerrado e anotaram a necessidade deste método corretivo em solos distróficos, tipificados na Lagoa da Confusão. Tal técnica influenciou no efeito das somas de bases e da fertilidade, como validado estatisticamente por este estudo, e conseqüentemente no retraimento da acidez no solo.

Estas ações de melhoramento químico são primordiais para a possibilidade de melhor aproveitamento de água disponível pela planta em sua fase produtiva, do que o estimado pela CAD, que foi calculada especulando-se uma profundidade efetiva de raízes invariável, em 50 cm, para todo o território estadual.

A tematização dos dados da plataforma de produções agrícolas municipais do IBGE (IBGE, 2017) levou a compreensão de que a região citada de proteção ambiental tem se demonstrado fortemente relacionada à atividade deste sistema produtivo, a sojicultura. Assim sendo este setor censitário, do Rio Formoso, destacando-se os municípios de Pium e Lagoa da Confusão, que detém mais de 6,45% da produção de grãos no Estado e 6,11% de área plantada, confirma a perspectiva de que as maiores produções municipais acompanham as maiores CAD, de 50 a 60 mm. No município de Cristalândia, por exemplo, estimam-se áreas com CAD acima de 60 mm.

Já no extremo norte do Estado, microrregião denominada de Bico do Papagaio, que apresenta o predomínio de Latossolos (31,8%) e Neossolos (24,3%), ocorreram pequenas capacidades de água disponível, chegando a um mínimo de 20 a 30 mm, e em concordância a isto se obteve inexpressivas produções municipais ao longo dos anos segundo o mesmo censo. Deve-se mencionar apenas o município de Darcinópolis, sul da microrregião, que possui uma área de cultivo de soja de 9.000 ha (1,0% da área estadual), com uma produção registrada de 31.320 toneladas no ano de 2017 (1,3% da produção estadual) e com CAD variando entre 30 a 40 mm.

Há no centro sul do Estado uma predominância de Latossolos Vermelhos e Amarelos e Argissolos. Segundo a Figura 11, existe um gradiente de prospecção de aportes físicos mais favoráveis à extração de água pelas raízes da espécie em estudo neste setor, sendo que, a maior parte, está localizada na microrregião de Gurupi. O centro das isolinhas, percebidas nesta figura para esta posição geopolítica, está no município de Peixe, que, segundo o IBGE (2017), se configura como maior produtor de soja do Tocantins dentre as demais unidades municipais, com aproximadamente 50.000 ha de área plantada (quase 6,0% do espaço ocupado pela soja no

Estado) e 148.890 toneladas de grãos produzidos (6,2% do total produzido no Estado) e CAD ultrapassando a margem dos 60 mm.

O mapa em detalhamento tematiza dentro desta faixa de valores de águas disponíveis a Área Estadual de Proteção Ambiental Lago de Peixe-Angical. Tão somente a partir deste produto matricial elaborado, induz-se a pensar que esta Unidade de Conservação de uso sustentável poderá sofrer em um futuro próximo uma pressão do setor agropecuário e em especial da cultura da soja, pois parte do entorno desta UC está inserido em uma CAD entre 50 a 60 mm, considerada favorável a produção agrícola. No entanto, a média de distribuição de precipitações anuais é de 1.552,49 mm, o que está abaixo da média estadual de 1.677 mm.

Estes índices pluviométricos são indicativos de uma provável menor relação entre a evapotranspiração real e a máxima de uma cultura, apesar de uma CAD acima da média apontada pelo histograma da Figura 11. Silva et al. (2020) ratificam que a deficiência hídrica pode afetar as trocas gasosas foliares (condutância estomática, transpiração, etc) e conseqüentemente a concentração interna de CO<sub>2</sub> nas plantas, reduzindo assim as condições necessárias para o crescimento das raízes. A profundidade efetiva, no experimento realizado por estes autores, foi significativamente impactada em função do aumento das tensões mátricas do solo. Ou seja, o manejo da cultura em sequeiro nesta localização pode não atingir a CAD retratada.

Também notou-se outra inconsistência com o que foi mapeado (Figura 11), especialmente no que se trata dos municípios reconhecidamente tratados como pólos agroindustriais da soja no contexto do Matopiba, o município de Mateiros e de Campos Lindos, ambos pertencentes à microrregião do Jalapão. Destaca-se que os Neossolos que apresentam menor faixa de retenção de água (PRADO, 2018), são recorrentes nesta microrregião (58,3% de sua área), a leste do Estado, em que foram quantificados 25.782 km<sup>2</sup> de CAD variando abaixo da média entre 30 a 40 mm, mais precisamente no município de Mateiros. Mesmo assim a produção e área plantada desta municipalidade no ano de 2017 o alocam como o segundo maior produtor do Estado, sendo estes índices agrônômicos comparáveis aos do município de Peixe ao longo dos últimos dez anos (IBGE, 2017).

O município de Campos Lindos do Tocantins também esteve à exceção do comportamento dos demais produtores ligados a essa atividade, vinculando-se com uma CAD relativamente regular, entre 40 e 50 mm. Rol de valores estes com maior frequência de distribuição pelo Estado, segundo o histograma definido pela Figura 11.

Essa última situação pode retratar que a disponibilidade hídrica tenha sido maior em função de técnicas de manejo adotadas (variação do cultivar, irrigação, dentre outros) ou

simplesmente porque as áreas agricultáveis destas unidades obtiveram uma oferta hídrica natural superior. Todavia, Melo et al. (2020) mapearam os riscos climáticos para soja no Cerrado brasileiro, considerando a data de plantio em 15 de novembro e CAD igual a 75 mm, caracterizando o Tocantins como de baixa probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica, excetuando a área de gestão municipal campolindense, classificada como de médio risco, ou seja, com chances maiores de déficit hídrico.

Outra inferência contrária a observada, refere-se à microrregião de Dianópolis (sudeste do Estado), cujas produções ficaram bem abaixo da média estadual. Assim sendo, esta regionalização da CAD indica uma potencialidade de desenvolvimento para esta região. Dianópolis é um entreposto estratégico, dada a logística de modal rodoviário entre os Estados da Bahia e Tocantins, que margeia um dos maiores pólos da sojicultura, o município de Luís Eduardo Magalhães, BA.

Destaca-se ainda que nesta região, o município de Arraias, sem histórico de produção, e de Taguatinga, com um histórico modesto de produção, mas sem contribuição para o ano de 2017, obtiveram valores da CAD de cerca de 65 mm.

O município de Dianópolis em contrapartida já teve uma evolução de produções de maior impacto regional, no que diz respeito ao ano safra de 2003/2004. O crescimento da década de 1990 até o ano de 2014 foi exponencial, partindo de uma produção de 50.000 toneladas em 2004, chegando a 105.000 toneladas em 2014 (5% da produção estadual para aquele mesmo ano) segundo o IBGE (2017). Este padrão de crescimento em relação às demais regiões do Estado pode arrazoar em favor da CAD mencionada.

A CAD é um parâmetro físico que potencializa, a partir de um regime pluvial favorável, a disponibilidade hídrica. Não obstante, há situações em que esta lógica não ocorre, sendo verificadas deficiências hídricas, necessidade de manejo de irrigação, bem como de outros tratamentos culturais, e pesquisas por diferentes genótipos de adaptação, em precipitações acima de 800 mm, ótimas para seu desenvolvimento, e com CAD expressiva. A faixa de umidade a ser extraída pela espécie é dependente exclusivamente da diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente quando o solo apresentar uma estrutura favorável. Solos com densidade global acima de  $1.43 \text{ Mg.m}^{-3}$  podem ter como limitante hídrico para o crescimento das raízes a aeração e a resistência à penetração (RODRIGUES et al., 2020).

O limite municipal de Dianópolis possui pluviosidade média mensal dos últimos 30 anos (1.703,6 mm) acima da média estadual (1.690,3 mm), o que a caracteriza como de clima provavelmente beneficiador ao rendimento da soja, e isto se soma ao fato da mesma ser agraciada por uma CAD, que é análoga aos grandes centros produtores. Porém o restante de sua

microrregião tem este parâmetro pluviométrico (1.564,5) abaixo da média mensal, com mínima de 1.307,8 e máxima de 1882,9. Se a cultura não for manejada adequadamente, nesta região, com um planejamento de semeadura pré-elaborado ou com a utilização de sistemas de irrigação, possivelmente o atual cenário de péssimas produções permaneça. Sabe-se que balanços hídricos decendiais poderiam melhor validar substancialmente estas informações aqui averiguadas.

A microrregião de Araguaína, principalmente os municípios de Xambioá, Araguaia, Aragominas, Muricilândia, Santa Fé do Araguaia e Araguaína, obtiveram médias de água disponível de 50 a 60 mm, maiores do que a média estadual diagnosticada pelo histograma da Figura 11. Em partes de alguns dos municípios estes valores ultrapassaram os 60 mm. Esta subdivisão política pertence ao bioma Amazônia e é integralmente formada por Argissolos. Prado (2018) delimitou que esta taxonomia de solos pertence à classe de água disponível maior do que uma gama de solos estudados, dentre eles, os Neossolos.

O presente estudo por fim ressalva a relevância da validação destes dados amostrais se forem conduzidos trabalhos que exijam maior detalhamento geográfico do Estado, planejamentos estratégicos que necessitam desta variável (a CAD) em escalas mais pormenorizadas, entre outros estudos locais.

Esta validação aqui conclusivamente proposta acontece por intermédio de outras pesquisas a níveis experimentais e de maior tempo de execução para valoração direta desta propriedade hidráulica, não realizados neste texto. Tais medidas laboratoriais suavizariam os erros de interpolação e abrandariam efetivamente os índices de dispersão existentes. Este é um pré-requisito para os projetos que dependem da maioria das inferências trazidas a partir das FTPs, a constante ampliação de sua acurácia. Este esforço notoriamente encarece as estimativas neste contexto de análise regional, tornando-a impraticável (MINASNY; MCBRATNEY, 2002).

#### 4.4 - Conclusões

As técnicas de plantio podem majorar os valores das CADs mapeadas neste estudo, desde que as mesmas atendam a perspectiva de ampliar a profundidade efetiva do cultivar adotada pela eliminação do alumínio com aplicação do gesso agrícola, em exemplo, ou a partir de melhorias genéticas, dentre outras tecnologias, e um efetivo planejamento agrícola.

No Estado do Tocantins identificou-se a microrregião do Rio Formoso, que é produtora de soja, com maior disponibilidade total de água para consumo agrícola, bem como de precipitações médias anuais acima da média estadual. Um estudo detalhado de época de semeadura associado a técnicas de manejo adequadas pode ser suficiente para que esta unidade seja considerada de baixo risco de deficiência hídrica e obtenha produtividades potenciais elevadas se comparadas com outros pólos regionais.

Ademais outros trabalhos devem ser realizados para verificação desta hipótese, que realizem o balanço hídrico desta oleaginosa e estimar numericamente a distribuição das deficiências hídricas relativas em um dado intervalo de tempo, com um mínimo de 15 anos de dados de chuvas e temperaturas observadas.

## Referências Bibliográficas

- ANDRADE, R. da S.; STONE, L.F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Piracicaba, v.15, p.111-116, 2011.
- ANJOS, J. C. R.; JÚNIOR, A. S. A.; BASTOS, E. A.; NOLETO, D. H.; MELO, F. B.; BRITO, R. R. Armazenamento de água em Plintossolo Argilúvico cultivado com cana de açúcar sob níveis de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 6, p. 464-473, 2017.
- ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 6, p.1023-1030, 1981.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. Viçosa: Imprensa Universitária da UFV, 2006.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Política Agrícola. **Portaria n.67, de 11 de julho de 2019**. Diário Oficial da União, n. 138, Seção1, p. 66, de 11 de julho de 2019.
- BRUNING, J.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; BOSCAINI, R.; CONCEIÇÃO, C. G.; GOLLO, E. A. Estimativa da curva de retenção de água no solo por função de pedotransferência. **Revista Cultura Agrônômica**, v. 28, n. 1, p. 97-110, 2019.
- CASTRO, A. M. G.; LIMA, S. M. V.; FILHO, A. F.; SOUZA, H. R.; SOUZA, A. R.; CASTRO, C. N. **Competitividade da cadeia produtiva da soja na Amazônia Legal**. Belém: SUDAM, 2001. 122 p.
- CICHOTA, R.; LIER, Q. J. V. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção da água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.4, p.585-596. 2004.
- COLLICCHIO, E.; ROCHA, H. R.; VICTORIA, D. C.; BALLESTER, M. V. R.; TOLEDO, A. M. A. Implicações das mudanças do clima no zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar no Estado de Tocantins, considerando o modelo GFDL. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife, v. 08, n. 06, p. 1730-1747, 2015.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa -SPI; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 355p.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, 2020**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>>. Acesso em: 26 jul. 2020.

IBGE. **Produção agrícola municipal, culturas temporárias e permanentes, 2017**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 06 mar. 2019.

FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; TOSTES, R. Propriedades físicas e matéria orgânica de um latossolo vermelho sob sistemas de manejo e cerrado nativo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.24, n.3, p.24-30, jul./set. 2008.

FREITAS, L. A.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; YANO, É. H.; SOARES, D. A.; PEREIRA, D. S. Soil physical and phenological attributes of soybean in different management systems and gypsum. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 12, n. 4, p.508-515, set. 2017.

GOMES, H. P. **Sistemas de irrigação: eficiência energética**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013. 281p.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 15. ed., Piracicaba: Fealq, 2009, 451 p.

HAGHVERDI, A.; ÖZTÜRK, H. S.; DURNER, W. Measurement and estimation of the soil water retention curve using evaporation method and pseudo continuous pedotransfer function. **Journal of Hydrology**, v. 563, p.251-259, 2018.

LEMOS, M. L. F.; GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. S.; AMARAL, G. F. Agregação de valor na cadeia da soja. **Agroindústria – BNDES**, Setorial, n. 46, p. 167-217, 2017. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14138/2/BNDES-Setorial-46SojaPBD.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2019.

LIMA, A. M. N. et al. Efeito do déficit hídrico e época de semeadura sobre os teores e rendimentos de óleo e proteína em cultivares de soja no Tocantins. **Revista de La Facultad de Agronomía**, La Plata, v. 116, n. 2, p.193-199, jun. 2017.

LUJÁN, J. G. **Riego por aspersión**. Madrid: Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX/MOPU. 1989.

MARTINS, E. C. A.; PELUZIO, J. M.; OLIVEIRA JUNIOR, W. P. de; TSAI, S. M.; NAVARRETE, A. A.; MORAIS, P. B. de. Alterações dos atributos físico-químicos da camada superficial do solo em resposta à agricultura com soja na várzea do Tocantins. **Biota Amazônia**, v. 5, n. 4, p. 56-62, 2015.

MELO, A. C. A.; NOBRE JÚNIOR, A. A.; SILVA, F. A. M.; ABREU, L. M. Zoneamento de risco climático para cultivo da soja no Cerrado. **Revista Nativa**, Sinop, MT, v. 8, n. 1, p.26-36, 2020.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 107, p. 55-70, 2002.

MORANDO, R.; SILVA, A. O.; CARVALHO, L. C.; PINHEIRO, M. Déficit hídrico: efeito sobre a cultura da soja. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 3, n. especial, p. 114-129, 2014.

NIKKEL, M.; LIMA, S. O. Growth and vegetative development of soybean plants in soil type concrectionary petric plinthosol. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 18, n. 4, p. 351-356, 2019.

PEREIRA, L. S.; VALERO, J. A. de J.; BUENDÍA, M. R. P.; MARTÍN-BENITO, J.M.T. **El riego y sus tecnologías**. Albacete: CREA-UCLM, 2010. 296 p.

PRADO, H. do. **Pedologia fácil**. 2018. Disponível em: <<https://www.pedologiafacil.com.br/index.php>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

PREVEDELLO, C.L.; ARMINDO, R.A. **Física do solo com problemas resolvidos**. 2. ed. rev. amp. Curitiba, 2015. 474p.

QUALISOLO - Informações. c2009. Disponível em: <<http://www.cnpdia.embrapa.br/>>. Acesso em: 12 mar. 2019.

RAHMAN, A. M.; LEE, S. H.; JI, H. C.; KABIR, A H.; JONES, C. S.; LEE, K. W. Importance of Mineral Nutrition for Mitigating Aluminum Toxicity in Plants on Acidic Soils: Current Status and Opportunities. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 3073, p. 1-28, 2018.

REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; PERAZA, J. E. S.; COSTA, A. Estimating water retention and availability in cultivated soils of southern Brazil. **Geoderma Regional**, Rio Grande do Sul, v. 21, n. 00277, p. 1-12, 04 abr. 2020.

RODRIGUES, T. R.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; ALVES JÚNIOR, J. Water availability to soybean crop as a function of the least limiting water range and evapotranspiration. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, GO, v. 47, n.2, p.161-167, 2017.

SANTOS, W; G.; MARTINS, J. I. F. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático e sua contribuição à agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, DF, v. 25, n. 3, p.73-94, set. 2016.

SILVA, J. A.; SANTOS, P. A. B.; CARVALHO, L. G.; MOURA, E. G.; ANDRADE, F. R. Gas exchanges and growth of soybean cultivars submitted to water deficiency. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, GO, v. 50, e58854, p.1-9, 2020.

SIPAM. **Base pedológica da Amazônia Legal**: base digital em escala compatível com a escala 1:250.000. Brasília, SIVAM; IBGE, 2004.

SOUZA, P; G. C.; BORGES JÚNIOR, J; C. F.; VIANA, J; H. M. Curva de retenção e disponibilidade total de água em latossolos empregando funções de pedotransferência. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 25, n. 5, p.417-427, 24 nov. 2017.

TOCANTINS, Secretaria do Planejamento do Estado do Tocantins (Seplan). **Base de dados geográficos do Tocantins - atualização 2012**. Palmas: Seplan, 2012 (Base de Dados Geográficos).

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.) **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p.319-344.

ZANON, A. J.; SILVA, M. R.; TAGLIAPIETRA, E. L.; CERA, J. C.; BEXAIRA, K. P.; RICHTER, G. L.; DUARTE, A. J.; ROCHA, T. S. M.; WEBER, P. S.; STRECK, N. A. **Ecofisiologia da soja visando altas produtividades**. Santa Maria: Palloti/SM, v. 1: 2018. 136p.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, GO, v. 45, n.2, p.128-137, 2015.

## 5 - CENÁRIOS DE RISCOS CLIMÁTICOS PARA A PRODUÇÃO DA SOJA E SUA RELAÇÃO COM AS UNIDADES DE CONSERVAÇÃO NO ESTADO DO TOCANTINS

### Resumo

As perspectivas atreladas às variações climáticas em um futuro a médio prazo tem se mostrado preocupantes, tanto em razão de desequilíbrios em ciclos biogeoquímicos de relevância para a saúde ambiental e humana, quanto na diversificação mercadológica de diversos produtos. O agronegócio no Estado do Tocantins é majoritariamente regido pela sojicultura, cujo sistema produtivo está invariavelmente associado à disponibilidade hídrica dada a irregularidade de precipitações no norte brasileiro, especificamente no bioma Cerrado. O zoneamento de risco climático tem por finalidade depor as faixas geográficas de menores probabilidades de ocorrência de deficiência hídrica, avaliação realizada por meio da distribuição de frequência de séries históricas do Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), visto como uma relação entre a evapotranspiração real e a máxima da cultura. Este indicador que define as janelas de semeadura da soja pode sofrer da influência das mudanças climáticas projetadas pelos diversos modelos existentes. Este trabalho objetivou valorar estas diferenças em dois cenários representativos do clima (RCP 4.5 e 8.5) para as 36 datas de semeadura do ano, três decêndios por mês, considerando 130 estações pluviométricas da ANA, zoneando em baixo, médio e alto risco climático a unidade federativa tocaninense e suas Unidades de Conservação em relação ao cultivo desta oleaginosa em sequeiro. Para isto, foram usados dados de precipitação e temperatura médias diárias de 30 anos observadas e estimadas pelo modelo MIROC5. As simulações de balanço hídrico de cultura foram executadas para o clima atual e futuro, entre 2021 e 2050, por um algoritmo desenvolvido em Python. A rotina de cálculos projetou os riscos de plantio da cultura da soja no Estado, onde foram estabelecidas relações com algumas de suas Unidades de Conservação, prevendo uma provável expansão no entorno das mesmas. As Áreas de Proteção Ambiental (APAs) da Ilha do Bananal/Cantão, do Lago de Palmas e da Serra do Lajeado, por exemplo, continuarão com baixo risco climático, enquanto 21,17% do território estadual passará de baixo a alto risco climático. Isto expôs também uma possível fragilidade econômica de alguns pólos agroindustriais e a necessidade de estratégias de adaptação climática, segundo a projeção mais pessimista, o RCP 8.5.

**Palavras-chave:** zoneamento; sojicultura; mudanças climáticas; ISNA

## 5.1 - Introdução

A partir da era pré-industrial houve indubitavelmente acréscimos alarmantes nas taxas de concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera em razão da emissão de poluentes e das alterações líquidas dos usos e ocupações territoriais. Esta perspectiva de desequilíbrio dos ciclos biogeoquímicos naturais com alto grau de confiança qualitativa tende a comprometer os sistemas climáticos atuais, forçando os mesmos a adquirirem energia. Este forçamento radiativo, catalisador das mudanças climáticas, tem crescido em razão da ausência de políticas governamentais e de tecnologias sustentáveis, que não são deletérias aos processos e recursos naturais (IPCC, 2014).

Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa do Brasil, o Estado do Tocantins quase dobrou a quantidade emitida de dióxido de carbono, registrando um aumento significativo de 84% no período de 1994 a 2004, em função das modificações em seu ordenamento territorial. Nos anos seguintes esta taxa retraiu, diminuindo as produções de GEE em 64%. Todavia os valores ainda são expressivos, especialmente devido a esta redefinição ocupacional, induzindo a inferir que o desmatamento das formações florestais vem promovendo cerca de 92% das emissões em 2018 (SEEG, 2020).

Esta obstrução do aproveitamento natural do carbono em outros compartimentos ambientais que provocam flutuações nas variáveis que constituem o clima tocantinense, introduzem cenários de riscos ao desenvolvimento da própria agricultura, reduzindo as áreas aptas ao plantio, e conseqüentemente nos demais elos das cadeias produtivas. O agronegócio estadual então deve remodelar seu planejamento gerando novas estratégias de adaptação e resiliência, como os propostos pelo Plano ABC (Agricultura de Baixa emissão de Carbono), reguladas em favor das demandas populacionais que crescem exponencialmente conforme as projeções anuais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (FÉLIX et al., 2020).

A sojicultura tem encontrado largo espaço na economia do Tocantins por se destacar no cenário nacional, mesmo embora não agregando valores aos seus produtos. Apenas como sistema produtivo, este Estado representa a décima segunda potência econômica do país neste setor, e o décimo maior produtor em área e em toneladas de grãos observados na safra 2017/2018, produzindo cerca de 2,1% do total nacional (IBGE, 2018). A exigência do comércio desta espécie é igualmente comprometida pelas perturbações deletérias do efeito estufa. No Brasil prospecta-se que entre 11 a 39% das áreas agricultáveis deixarão de ser de baixo para alto risco climático para a soja entre 2011 e 2040 (MONTEIRO et al., 2015).

A cultura da soja tem seus rendimentos potenciais reconhecidamente correlacionados de forma positiva com às suas respectivas deficiências hídricas relativas. Estas relações são mais evidentes a partir da fase fenológica inicial e também do estágio que antecede a maturação, entre o florescimento e o enchimento de grãos. A partir da semeadura, o desenvolvimento das plântulas iniciais é evidentemente impactado em climas áridos, sendo altamente dependente das precipitações médias mensais. Tal fator ambiental também expõe diferenças significativas no peso de mil sementes, no vigor das mesmas e no percentual de germinação (CORREA et al., 2019). A porcentagem germinativa observada foi igual ou superior 80 % na gama de cultivares experimentadas com sementes de médio vigor em um sistema convencional de irrigação por aspersores. Esta vigorosidade, diferenciada, pode ser usada como tecnologia para ampliar a produtividade em ambientes de climas mais irregulares como o do Matopiba, acrônimo de referência ao pólo de produção agropecuária delimitado entre os Estados de Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (RODRIGUES et al., 2018).

O zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) é a ferramenta indispensável para mensuração das regiões mais prováveis de baixo, médio ou alto desempenho agrícola. O ZARC é normalmente divulgado para as unidades federativas por meio de portaria específica publicada em diário oficial da União pelo Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Os dados oficiais identificam o planejamento das épocas de plantio, levando em consideração as precipitações, temperaturas e evapotranspirações potenciais decendiais, bem como a tipologia física dos solos regionais (convenientemente hipotetizados em três lâminas de armazenamento de água no solo) e de fatores fenológicos de grupos de cultivares (BRASIL, 2019). Para a soja, o ZARC objetiva a determinação do Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), fundamentado como a relação entre a evapotranspiração real e a máxima de uma cultura como delineador das janelas de semeadura com maior probabilidade de ocorrência de eventos de baixa deficiência hídrica.

A cultura da soja nos últimos anos vem se expandindo por todo o Estado, inclusive no entorno e dentro das Unidades de Conservação (UC). O potencial contato ou já existente da atividade sojícola em UC, deverá primordialmente preservar a sua própria finalidade, bem como ter um sistema produtivo sustentável em locais não proibitivos legalmente ou devido a risco climático favorável à sua sustentabilidade econômica. Considerando as tendências futuras da produção de soja na região de Unidades de Conservação, devido às questões ambientais e econômicas, torna-se relevante o tema referente às mudanças climáticas, pois podem alterar especialmente a temperatura e a chuva, as quais são responsáveis por determinar o desenvolvimento e produção das culturas (IPCC, 2014). Ainda de acordo com o IPCC (2014),

estima-se que em 2040 a elevação da temperatura poderá atingir 2°C no cenário RCP 4.5 (otimista) e até 3°C no cenário RCP 8.5 (pessimista). Com relação a precipitação, Chou et al. (2014) realizaram simulações que indicam uma redução de chuvas para o Estado do Tocantins, de 5% a 15%, até o final deste século.

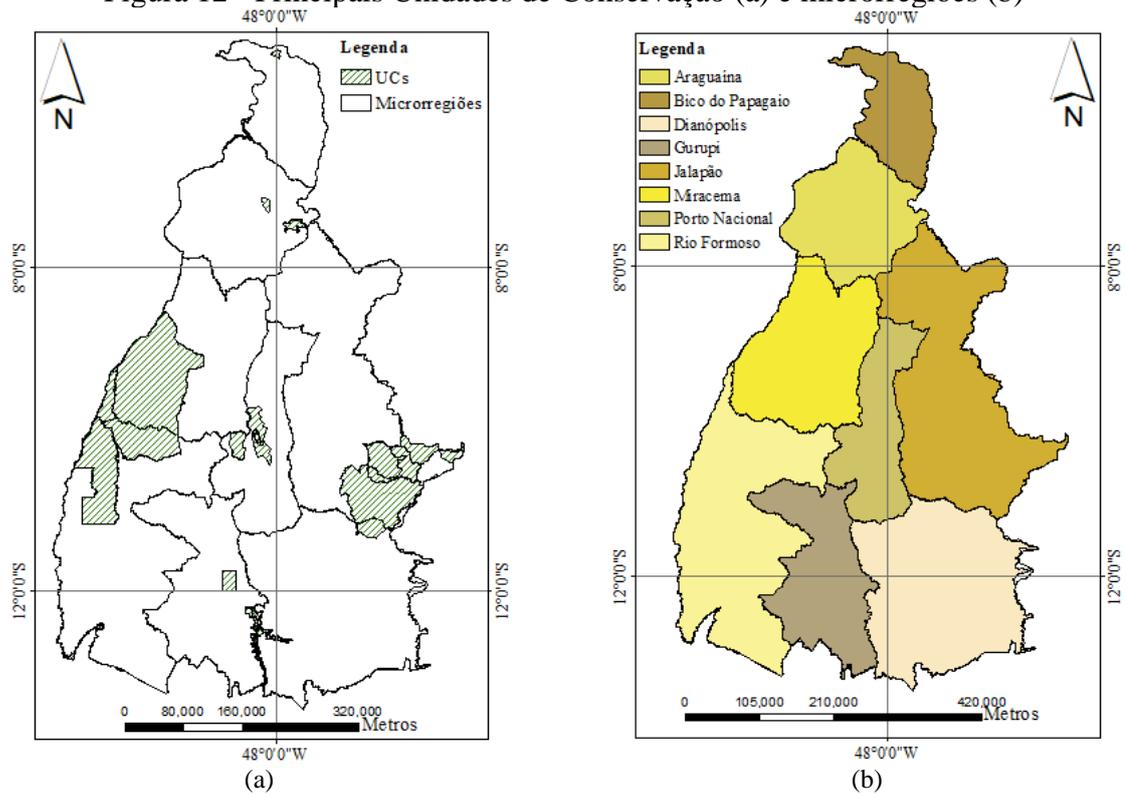
Considera-se a hipótese de que as Unidades de Conservação continuarão, independente das mudanças climáticas, com baixas probabilidades de deficiência hídrica durante sua fase de reprodução em relação às demais regiões do Estado, e, portanto, poderão sofrer uma pressão significativa do agronegócio a curto prazo. O objetivo desse trabalho visa então prognosticar os riscos climáticos da cultura da soja no Estado do Tocantins e em suas Unidades de Conservação entre os anos de 2021 a 2050, considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5 do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). A presente modelagem foi construída por meio da linguagem Python, que simulou, em cada cenário de temperaturas e precipitações médias decenais, cálculos de balanço hídrico para 36 datas de semeadura e 130 estações meteorológicas de uma cultura com ciclo de desenvolvimento médio.

## **5.2 - Material e métodos**

A área de estudo é a unidade federativa do Tocantins, que se localiza a sudeste da grande região Norte do país, definido entre as latitudes 05° 10' e 06'' e 13° 27' e 69'' e longitudes 45° 41' 46'' e 50° 44' 33''. Segundo o levantamento pedológico disponibilizado pela base de atualização da Secretaria de Planejamento do Estado – Seplan (TOCANTINS, 2012), o Estado do Tocantins possui em maior parte Plintossolos, que são conceitualmente conhecidos como de precária drenagem subsuperficial, abrangendo 35 % de seu território. Em contrapartida segundo a mesma fonte 20% de seu espaço é de Latossolos, bem drenados, o que pode permitir sua maior retenção de água.

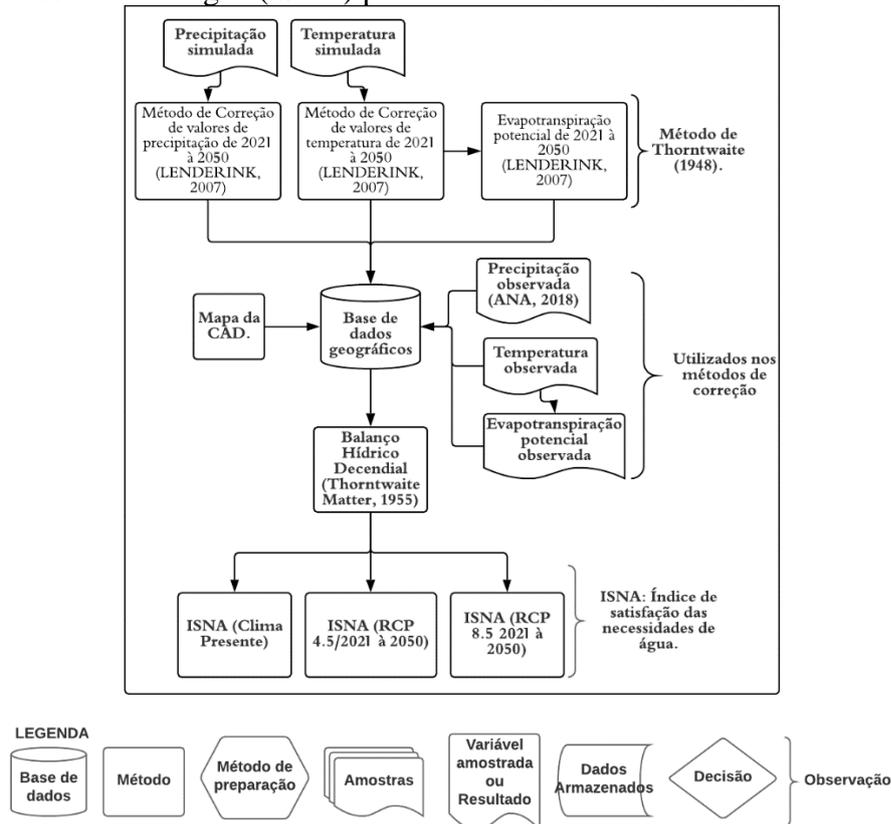
Conforme diagnosticado por Collicchio et al. (2015) as temperaturas mais altas coincidem com os meses mais secos em torno de 27,1 °C e as mais baixas são de 24,7 °C em junho. O Estado do Tocantins, suas principais Unidades de Conservação, e suas microrregiões, são ilustradas pela Figura 12.

Figura 12 - Principais Unidades de Conservação (a) e microrregiões (b)



O fluxograma das etapas metodológicas para a definição dos zoneamentos de risco climático atual e prospectados num futuro próximo, entre 2021 e 2050, pelo modelo global MIROC5 está apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma da metodologia adotada para obtenção dos Índices de Satisfação da Necessidade de Água (ISNA) para diferentes cenários de riscos climáticos



Foram usadas duas constantes de reflexão radiativa dos gases de efeito estufa na atmosfera, RCP 4.5 e RCP 8.5. Ambos espelham as mudanças climáticas tendenciais e pessimistas, respectivamente. Vale ressaltar que um produto do capítulo anterior, que refere-se ao mapa da CAD para a soja, conforme indicado na Figura 13, foi usado como dado primário desenvolvido neste trabalho de entrada para as simulações de balanço hídrico de cultura em 36 datas de semeadura e 130 coordenadas de estações pluviométricas nos dois cenários de emissão de poluentes atmosféricos citados. Os produtos finais servirão de variáveis estáticas para a modelagem da dinâmica de uso e ocupação da soja, tema do próximo capítulo.

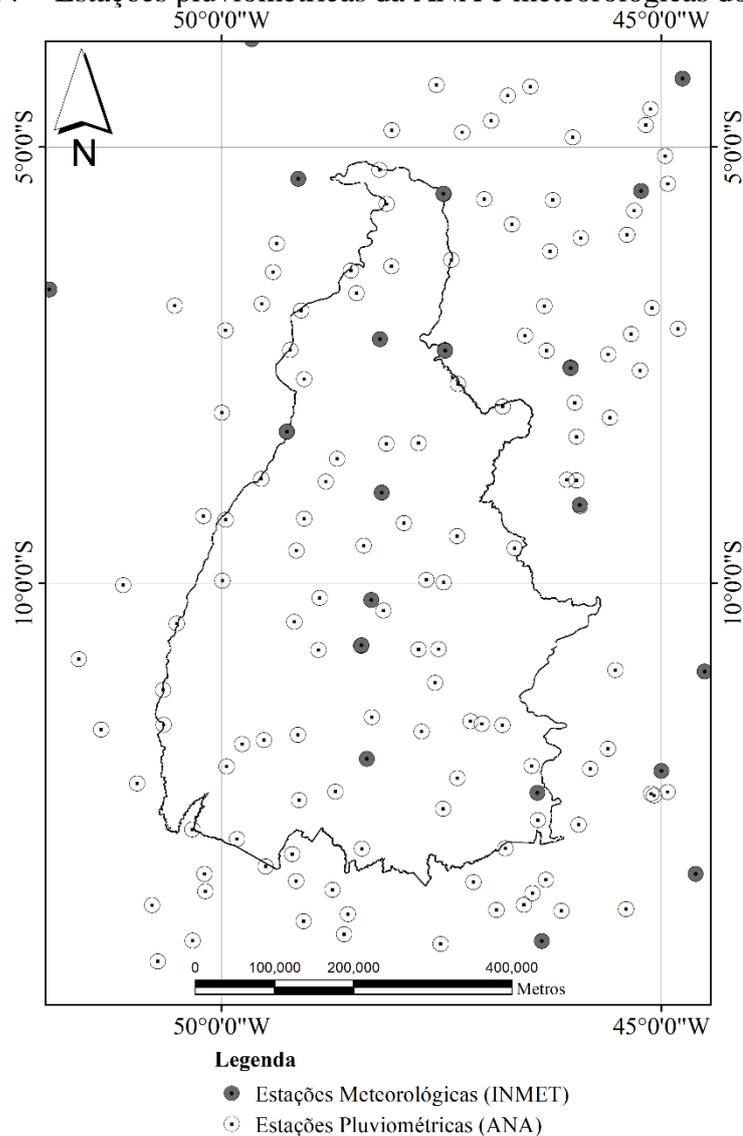
Os dados de chuvas coletados da Agência Nacional das Águas (ANA) foram organizados em planilhas, no formato de banco de dados da Microsoft Access, padrão desta instituição governamental (ANA, 2018). Uma rotina algorítmica foi criada para retirar da amostra coletada estes índices pluviométricos municipais diários em um intervalo de 30 anos, compreendendo o período entre 1986 e 2017, expondo suas fragilidades de medição. Este banco de dados selecionou apenas as estações pluviométricas cujo número de falhas (ausências nas mensurações) não ultrapassou 30% de suas séries históricas.

Em seguida, o algoritmo teve como sub-rotina o preenchimento de falhas nas 130 estações escolhidas. A complementação destas unidades meteorológicas se deu por intermédio de escolha da melhor regressão linear, definida estatisticamente, entre as pluviosidades diárias da estação a ser corrigida e das pluviosidades diárias das estações 100 km mais próximas. A distância relatada é um limite representativo do clima local, segundo a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2010), sendo que a mesma pode variar localmente em razão de condicionantes topográficos.

A biblioteca associada a este código em Python recém construído e que objetiva preencher estes erros sistemáticos é de origem do software de manipulação de dados estatísticos e matriciais (geográficos), o R, gratuitamente disponível. As lâminas precipitadas também se sujeitaram a uma averiguação de sua consistência métrica pelo método da dupla massa.

Os registros de temperatura média diária foram retirados de 31 estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que recobrem a área de influência deste estudo. Esta variável foi estimada para as demais estações pluviométricas com uso de uma ferramenta da linguagem Python direcionada para o aprendizado de máquinas. Esta biblioteca realizou regressões de combinações lineares entre as temperaturas médias decenciais, como variável dependente, e a altitude, longitude e latitude, das séries amostradas como variáveis independentes. Depois de valorados os coeficientes dos ajustamentos lineares citados, construiu-se as séries temporais de temperatura média decencial de trinta anos para as 130 estações pluviométricas da ANA, entre 1986 e 2017. As estações de temperatura e precipitação estão espacializadas na Figura 14.

Figura 14 - Estações pluviométricas da ANA e meteorológicas do INMET



Imediatamente depois, aperfeiçoou-se a interface proposta por Victoria et al. (2007) que calcula a evapotranspiração potencial mensal pelo método de Thornthwaite (1948), para a mesma refazer os procedimentos sequencialmente no intervalo proposto de 30 anos de médias decendiais.

De posse dos dados de precipitação, temperatura e evapotranspiração diárias foi então simulado, usando uma rotina em linguagem Python, o cálculo do balanço hídrico sequencial decendial como o proposto por Thornthwaite; Mather (1955) para 36 datas de semeadura, para fins de representação da disponibilidade hídrica de dez em dez dias, da evapotranspiração real da cultura (ETR) e de sua evapotranspiração máxima (ETM) durante a fase fenológico de floração e enchimento dos grãos.

Para tanto foi considerado um ciclo de vida da planta em torno de 125 dias e os seus respectivos coeficientes de plantio (Kc), iguais aos definidos pelo grupo de maturidade relativa (GMR) média do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2019), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes da cultura (Kc) estabelecidos por decêndios durante o ciclo da cultura da soja.

GMR	Decêndios												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Grupo II	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	1,4	1,3	1,2	0,9	0,8

Estes fatores climatológicos limitantes do desempenho da soja uma vez obtidos foram relacionados para se compor o Índice de Satisfação da Necessidade de Água (ISNA) da cultura, de acordo com a equação 9. Estes índices tiveram sua média por ciclo reprodutivo calculada durante os 30 anos. Buscou-se pelo ISNA correspondente ao nível de risco de 20% de deficiência hídrica da distribuição de frequência deste indicador, para cada época de plantio simulada e em todas as 130 estações pluviométricas da ANA (EVANGELISTA et al., 2017; BRASIL, 2019).

$$ISNA = \frac{ETR}{ETM} \quad (9)$$

A partir disto, elaborou-se mapas dos riscos climáticos à produtividade da cultura da soja para cada data de semeadura no Estado do Tocantins por meio de um interpolador disponível em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), o Spline de Regularização de Tensões.

Então as zonas de riscos por época de plantio foram consideradas baixas para as regiões que possuíam um ISNA com frequência de 80% durante o estágio reprodutivo da planta acima de 0,65. O zoneamento das áreas de médio risco teve como critério a variação de ISNA a 80% entre 0,55 e 0,65. Abaixo de 0,55 as localidades são consideradas de alto risco climático, cujo empreendimento possui grandes chances de insucesso por falta de disponibilidade hídrica, em caso de ser implementado como de agricultura de sequeiro.

Por intermédio de um algoritmo especialmente redigido para instrumentação dos dados dos modelos regionais climáticos do Quinto Relatório do IPCC, utilizando a biblioteca netCDF4 em linguagem Python, se fez possível a coleta e a correção dos dados simulados de precipitação e temperatura nos anos de 2021 a 2050 em dois caminhos representativos de

emissão de poluentes atmosféricos (Representative Concentration Pathways, RCP), o RCP 4.5 e o RCP 8.5.

O modelo utilizado foi o MIROC5, que refere-se ao modelo climático japonês de circulação global. A precipitação e a temperatura para estes cenários foram corrigidas utilizando-se um método de correlação direta, o *delta change approach*, conforme definido por Lenderink et al. (2007), sendo que para a temperatura foi utilizada a equação 10 e para a precipitação, a equação 11.

$$T_{\text{cor,m,d}} = T_{\text{sim,m,d}} + \mu(T_{\text{obs,m}}) - \mu(T_{\text{sim,m}}) \quad (10)$$

$$P_{\text{cor,m,d}} = P_{\text{sim,m,d}} \times \frac{\mu(P_{\text{obs,m}})}{\mu(P_{\text{sim,m}})} \quad (11)$$

Onde  $T_{\text{cor,m,d}}$  e  $P_{\text{cor,m,d}}$  são respectivamente a temperatura (°C) e a precipitação (em mm) simulada corrigida do mês “m” e do decêndio “d” no intervalo de 2021 à 2050, enquanto  $T_{\text{sim,m,d}}$  e  $P_{\text{sim,m,d}}$  são as temperaturas e precipitações simuladas do modelo MIROC5 para o mês “m” e o decêndio “d” na série de mesmo espaço temporal. Os valores de  $\mu$  serão as médias decendiais dos meses “m” destes condicionantes na fração de tempo chamada baseline, que serviram de referência para o modelo de previsão (OLIVEIRA; PEDROLLO; CASTRO, 2015). Estas médias são das temperaturas e precipitações simuladas,  $\mu(T_{\text{sim,m}})$  e  $\mu(P_{\text{sim,m}})$ , e observadas,  $\mu(T_{\text{obs,m}})$  e  $\mu(P_{\text{obs,m}})$  no período entre 1986 e 2005.

Assim sendo, se realizou novos balanços hídricos para apreciação de novas evapotranspirações potenciais (ETP), reais (ETR) e máximas (ETM) geradas para os caminhos representativos (RCP) 4.5 e 8.5, tendencial e pessimista respectivamente, do modelo citado a fim de se retratar os índices ISNA espacialmente em ambos cenários, e nas 36 datas de inicialização do ciclo de desenvolvimento do cultivar.

Por meio da técnica de *overlay mapping* elaborou-se os mapas de zoneamento de risco finais para o clima atual e o estimado pelo modelo MIROC5, em seus cenários de relativo controle e descaso das políticas governamentais em relação aos programas de amortecimento da concentração de dióxido de carbono atmosférico, RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. O trabalho consistiu na ilustração espacial das áreas de baixo risco climático, que contém ao menos uma data de semeadura, dentre as 36, com ISNA superior a 0,65. O mesmo critério foi definido para as áreas mapeadas de médio e de alto risco, que devem possuir ao menos uma data de plantio no intervalo de ISNA considerado para sua classificação (MONTEIRO et al., 2015).

Esta sobreposição orientou o diagnóstico da possibilidade de estreitamento das áreas agricultáveis e o aumento da pressão agrícola no entorno de algumas Unidades de Conservação e Proteção Integral, cujo plano de informação geográfica foi obtido pela Secretaria de Planejamento do Estado (Seplan, 2012), a médio prazo.

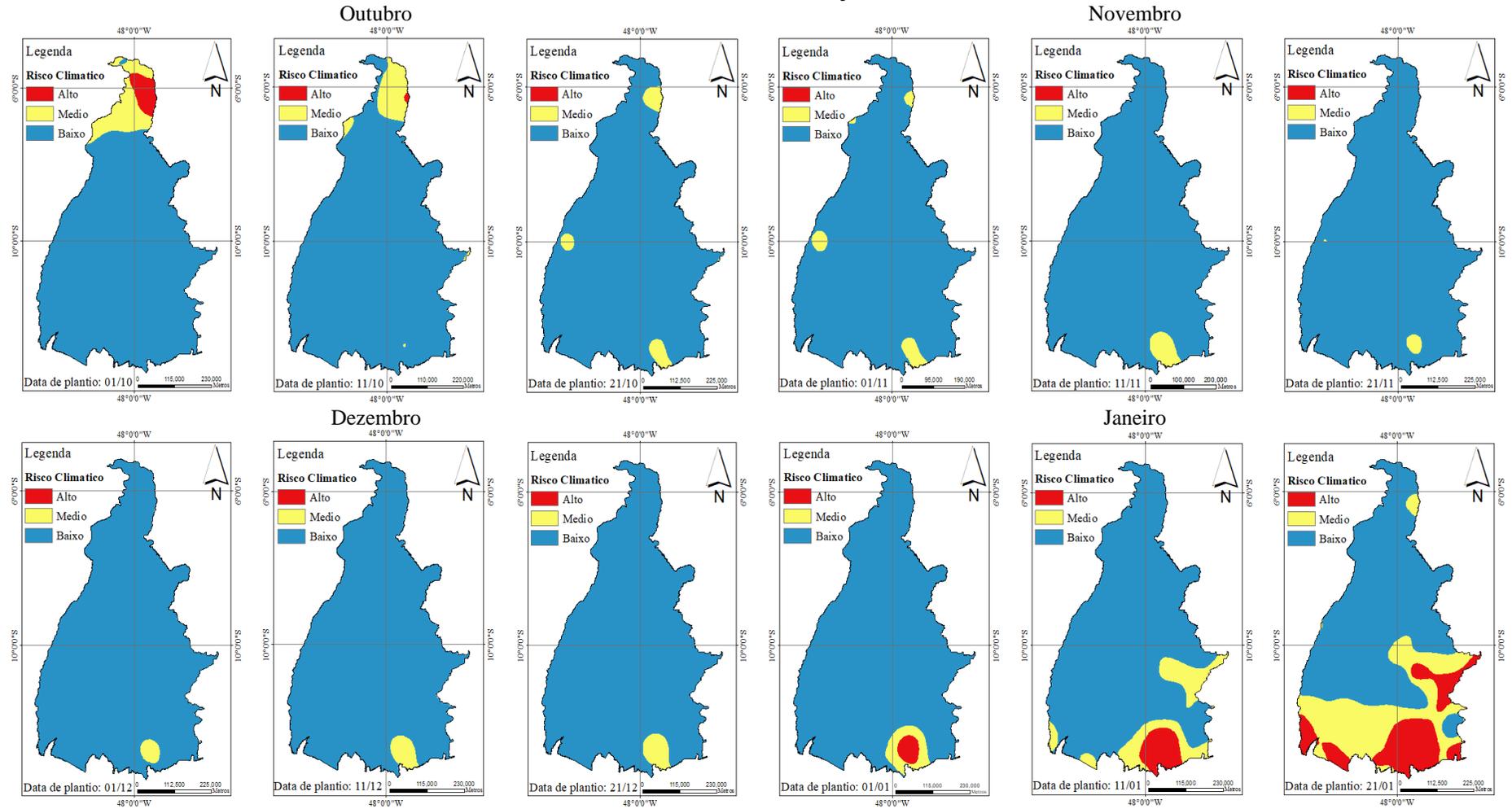
Pretendeu-se também secundariamente construir uma discussão acerca dos mapas temáticos gerados, sobre a necessidade de sugestões em locais prioritários para implantação de mecanismos de adaptação aos riscos em face à probabilidade de insucesso nos rendimentos agrícolas em um futuro próximo. Esta adaptação pode ocorrer pela expansão de área ou por redefinição de manejo e outras técnicas agronômicas, em consequência de uma provável má disponibilidade hídrica, alto risco expresso pelo ISNA no referido estágio reprodutivo da soja. Estes sistemas produtivos complexos e renomados no atual contexto do mercado de soja foram aqui percebidos pela espacialização das produções agrícolas municipais e receitas brutas da sojicultura pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018).

### **5.3 - Resultados e Discussão**

A simulação de balanço hídrico das 36 datas de semeadura para o período observado, contemplando 130 estações de precipitação da ANA permitiu identificar as janelas de semeadura da cultura da soja para o Estado do Tocantins, zoneando este território em áreas de baixo, médio e alto risco climático.

A Figura 15 mostra as simulações dos riscos climáticos de datas de semeadura para o período de outubro a janeiro dada a situação climática atual. Nesses meses visualizam-se faixas territoriais significativas em termos percentuais para fins de manejo desta cultura sem o uso intensivo de métodos de irrigação e com menor insegurança quanto ao surgimento de atributos, que refletem a senescência tardia ou de outros caracteres que denotam prejuízo de produtividade em sua fase reprodutiva em razão de deficiência hídrica (ZANON et al., 2018).

Figura 15 - Risco climático das nove datas de semeadura da cultura da soja (GMR=média) que representam os decêndios dos meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro



Observou-se que o plantio da soja não deve ocorrer nos primeiros decêndios de outubro na região norte, mais detalhadamente na microrregião do Bico do Papagaio, pois existe a probabilidade de ocorrência de desempenhos agrícolas medianos ou de grande risco de inviabilidade de empreendimento, principalmente no primeiro decêndio. O registro das produções agrícolas municipais apontadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) não configura, em nenhum dos anos safras dos últimos 15 anos, produção de grãos de soja nesta localidade (IBGE, 2018).

Nota-se que no período de outubro a dezembro a maioria do território tocantinense apresenta risco climático baixo para o cultivo da soja de ciclo médio, contudo restrições médias e elevadas, especialmente nas datas de plantio 01/10, 01/01, 11/01 e 21/01, sendo mais críticas no início de outubro e final de janeiro.

Nos meses de novembro e dezembro, no entanto, qualquer data de plantio é permitida com baixo risco climático, com exceção de algumas poucas regiões cujas evapotranspirações reais são recorrentemente menos expressivas no estágio fenológico em caracterização, de florescimento a enchimento dos grãos, em especial destaque a região sul do Tocantins.

Fidelis et al. (2007) realizaram quatro ensaios no município de Gurupi, com vinte diferentes genótipos desta leguminosa, e encontraram produções de grãos equivalentes e abaixo da viabilidade relativizada por cultivar em data de semeadura no mês de janeiro. Nesta região, isto também foi percebido por Barbosa et al. (2011), não apenas no percentual relativo de produtividade de grãos, mas também na biossíntese de óleo, observando correlação direta e positiva entre estes últimos indicadores. Estes parâmetros de desempenho diminuem substancialmente na medida em que o plantio atrasa, se distanciando das épocas de semeadura realizadas no final de novembro (BARBOSA et al., 2011; BARROS et al., 2003).

As simulações, apresentadas na Figura 15, demonstram que os três últimos decêndios do mês de janeiro vão de encontro a este comportamento. A região sul do Tocantins começa a possuir faixas de médio a grande risco climático, frequência relativamente alta de insuficiência hídrica nas séries históricas observadas. Para a terceira data simulada pelo balanço hídrico, 21 de janeiro, o Tocantins passa a ter 14,76% de sua área potencialmente inviabilizada para cultivo.

As áreas experimentais de Gurupi supracitadas anteriormente localizam-se em proximidade desta circunstância, com um ISNA médio. Este estudo não se propôs à modelagem das produtividades potenciais, embora reflita uma relativa predisposição às precipitações médias aceitáveis durante a reprodução desta leguminosa para esta época de plantio, reconhece a precisão de uma determinação *in situ* e recomenda assim uma atenção por parte do empreendedor em não postergar a plantação.

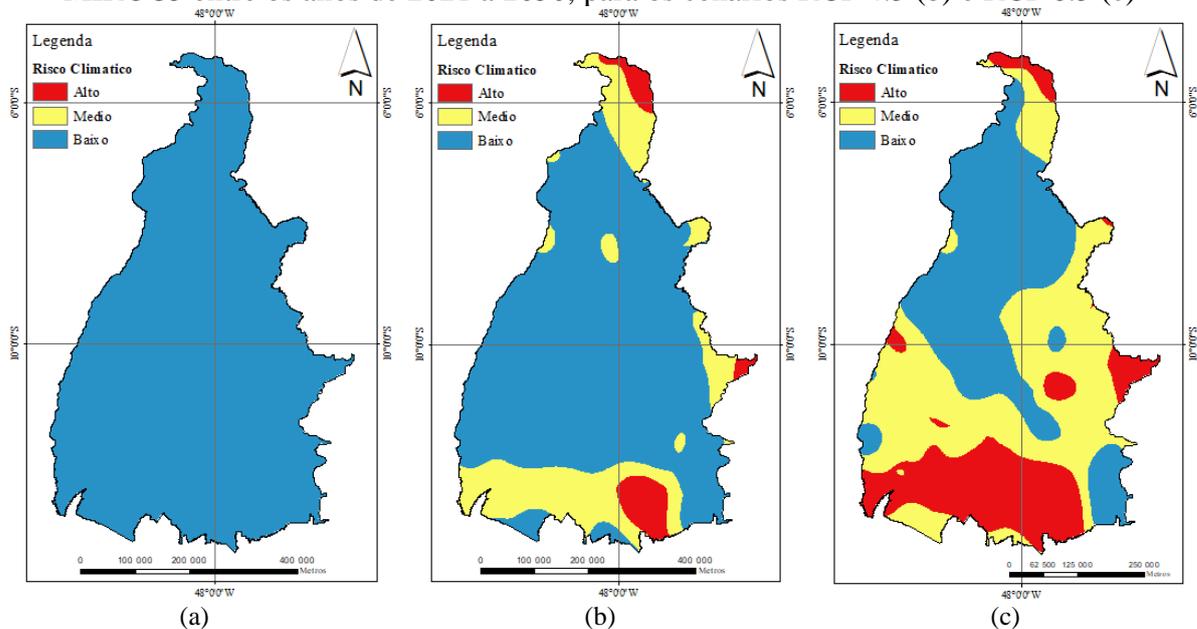
Com relação aos riscos de cultivo de soja em áreas de UC e/ou seu entorno, foram analisados dois grandes mosaicos de UC localizados nas porções oeste e leste do Estado. Na parte oeste, localiza-se a APA da Ilha do Bananal/Cantão, fundada pela Lei nº 907 de 20 de Maio de 1997, cuja atividade agropecuária pode ser realizada, com exceção em zonas de restrições estabelecidas pelo seu planejamento legalmente instituído. Observando-se a Figura 15, constata-se que existe uma janela de semeadura para esta APA, estimada segundo o nível de riscos de deficiência hídrica estabelecido, mais ampla em relação ao mosaico de UC do Jalapão, situada a leste, e às demais UCs existentes. Pode-se afirmar um interesse pelo agronegócio em áreas nesta região, em consequência desta premissa que traz maior expectativa de economia em custos de produção, dada a inexistência de sistemas de irrigação, mesmo que firmadas datas de plantio precocemente ou tardiamente.

Algumas ações que visavam dirimir a preservação e conservação dos recursos naturais desta APA foram criadas por falhas jurídicas estaduais e pela atuação do Conselho Deliberativo, que culminaram na suspensão do Plano de Manejo e do licenciamento ambiental temporariamente das atividades agrícolas, segundo Moreira; Collicchio (2017). Estas medidas geraram um desmatamento significativo, que acompanhou crescimento da sojicultura nesta UC na última década, inclusive em áreas proibitivas ao manejo agrícola (MOREIRA; COLLICCHIO, 2017).

No que se refere ao Mosaico de Unidades de Conservação do Jalapão, este possui três unidades federais e duas estaduais no Estado do Tocantins, pertencentes ao município de Mateiros, São Félix do Tocantins, Ponte Alta, Almas, e Rio da Conceição. Gamba; Collicchio (2018) observaram números expressivos de produção em grãos e de expansão de área, particularmente em Mateiros, por se configurar como segundo maior produtor deste complexo de preservação ambiental, e em Almas, dadas as taxas de crescimento desta cultura no município. De acordo com a Figura 15, esta região possui datas de plantio, favoráveis nos decêndios de outubro a dezembro, bem como até o primeiro dia de janeiro.

O mapeamento de áreas de risco dos dados atuais de chuvas e temperaturas diárias nos últimos 30 anos, Figura 16-a, é semelhante ao definido por Evangelista et al. (2017). Em ambos percebe-se que existe pelo menos uma época de semeadura em que não ocorrerá deficiências hídricas na fase fenológica de florescimento a enchimento de grãos para prejuízo de rendimentos potenciais economicamente impraticáveis. O futuro a médio prazo, todavia, redefine este cenário atual colocando maior vulnerabilidade nesta divisão geográfica de planejamento, trazendo maior probabilidade de se obter baixas produções no município de Mateiros (leste), no sul e parte da região norte do Tocantins.

Figura 16 - Comparação entre as áreas de baixo, médio e alto risco climático para as séries históricas de chuva e temperatura observadas entre 1986 e 2017 (a), e estimadas pelo modelo MIROC5 entre os anos de 2021 a 2050, para os cenários RCP 4.5 (b) e RCP 8.5 (c)



Estes cenários estabelecidos pelo IPCC, que refletem nos ISNAs, entre 2021 e 2050, prospectam uma possível fuga de investimento num dos maiores pólos agroindustriais de soja na unidade federativa, o município de Campos Lindos, que se situa no mesmo agrupamento de municípios de Mateiros, a microrregião de Jalapão. O município de Mateiros abriga parte do mosaico de UCs do Jalapão. O MapBiomias em sua quarta coleção inventariou geograficamente áreas de culturas anuais na totalidade da delimitação da APA Serra da Tabatinga, pertencente a este mosaico e ao referido limite municipal (MAPBIOMAS, 2020).

A municipalidade campolindense terá segundo Silva (2018), que utilizou do mesmo modelo deste estudo, uma pegada hídrica (PH) verde decrescente ao longo do século, ao passo que serão demandadas pela cultura maiores quantidades de águas provenientes de reservatórios hídricos naturais, o que traduz um significativo acréscimo de PH azul durante este período. O mesmo autor encontrou uma maior produtividade futura, com incrementos de 0,97 e 1,97 t/ha em relação ao clima atual para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente. Estes resultados espelham o aumento da PH azul e não da componente verde, que é ditada pelo regime pluviométrico. Esta observação de Silva (2018), de que a PH verde diminuirá em torno de 14,3% e de que a PH azul crescerá em mesma proporção, condiz com o esperado por estas projeções a médio prazo (Figura 16-b e Figura 16-c), no que diz respeito a um maior risco de declínio da água disponível e de um maior uso de técnicas de irrigação.

A Reserva Extrativista do Extremo Norte do Estado do Tocantins fundada pelo Decreto lei nº 535 de 20 de Maio de 1992 é declarada como de interesse social, segundo o mesmo dispositivo de lei em seu artigo 4. Embora haja certa flexibilização na prospecção dos recursos naturais nesta unidade, em garantia de desenvolvimento sustentável e um conflito histórico entre fazendeiros e as comunidades de quebradeiras de côco (SOUSA; OLIVEIRA, 2017), o presente estudo reafirma o desinteresse econômico constatado no censo oficial do IBGE (2018). Isso possivelmente por não constituir janelas de produtividade, em 24,5% da microrregião do Bico do Papagaio e em toda a Reserva Extrativista, num futuro próximo, para o cenário RCP 4.5. Outros 70,8% terão datas de plantio com menores riscos climáticos, no entanto considerados de média probabilidade de ocorrência de deficiências hídricas.

A Área de Proteção Ambiental da Ilha do Bananal/Cantão, que compõe o mosaico de UC do Cantão, pertence a uma fração do território tocantinense que reúne as maiores chances probabilísticas de disponibilidades hídricas ensejadas economicamente para sojicultura em um futuro próximo cujas emissões de dióxido de carbono na atmosfera sejam consideradas tendenciais, forçante RCP 4.5 do modelo MIROC5, em decorrência da continuidade do tratamento governamental das políticas públicas relacionadas às mudanças climáticas, conforme Figura 16-b. Este cenário causa assim certa pressão nestas áreas e em seus entornos protegidos para fins de desenvolvimento sustentável, uma vez que outras áreas até então agricultáveis poderão ser vinculadas até 2050 como de provável estabelecimento de baixas produtividades.

Em um cenário mais pessimista, um caminho representativo de concentrações mais significativo em lançamento de poluentes atmosféricos, RCP 8.5, o sul da APA da Ilha do Bananal/Cantão (23,47%) será considerado como de média probabilidade de perda de rendimento potencial (ISNA entre 0,55 e 0,65), logo suas janelas de semeadura definem uma possível deficiência hídrica. A referida UC passará a ter também 2,38% de ISNAs abaixo de 0,55, na fronteira com o Parque Estadual do Cantão e o Parque Nacional do Araguaia. Tal UC foi pouco afetada pela espacialização de riscos se comparada com a região de Mateiros, com grande parte do sul do Tocantins, e com o norte do Estado, que somados representarão impraticáveis, para o manejo desta cultura agroenergética, 21,17 % do Estado do Tocantins, em função dos riscos inerentes assumidos entre 2021 e 2050.

A APA do Parque do Lajeado (PEL), inserida integralmente dentro da Serra do Lajeado, foi sancionada também sem ser de caráter de proteção integral, dentro do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC). Isto é justificável em razão da presença da Usina Hidrelétrica Luís Eduardo Magalhães e da forte influência pré-existente da capital nas

modificações ambientais consoantes ao avanço da agropecuária ocorridas até meados de 2010 (FURTADO; CRISTO, 2018). A mesma UC se encontra sujeita a baixos riscos climáticos, com janelas produtivas adequadas, entretanto são margeadas pela faixa de médio ISNA, o que pode contribuir para a continuidade da dinâmica de usos e ocupações de 2010 a 2015 definido por Furtado; Cristo, (2018). Estes autores observaram uma eficiência de aplicação do Parque por meio da classificação por sensoriamento remoto de parcelamentos de áreas rurais, o que dirimiu a taxa de supressão de áreas de vegetação nativa. No entanto, tanto o PEL quanto as APAs do Lago de Palmas e da Serra do Lajeado, por serem aqui consolidados como de baixos riscos climáticos nos dois cenários, excetuando 22,06% de risco médio da Serra do Lajeado em RCP 8.5, devem ser geridas com atenção. Sugere-se assim tomadas de decisão mais severas, de medidas preservacionistas, como a reformulação dos quesitos de licenciamento ambiental, num futuro não distante.

Em contrapartida a esta análise, a microrregião de Porto Nacional, um dos cinco municípios que mais possuem área de soja no Tocantins, representando aproximadamente 4,32% do total de área plantada no Estado, é também vinculada inteiramente em baixo risco climático, em ambos os cenários entre os anos de 2021 a 2050. Supõe-se, portanto, que esta seja a área de maior prospecção na primeira metade do século XXI e alvo de empresas agrícolas de grande porte de vários elos da cadeia produtiva. A microrregião de Porto Nacional terá 57,94% de sua área de baixo risco climático, conquanto a gestão pública municipal abrigará em seu espaço 89,25% de ISNAs promissoras ao manejo da cultura, acima de 0,65, no viés pessimista das simulações apresentadas. Contudo, no cenário otimista, RCP 4.5, todos estes percentuais serão de 100%, iguais ao clima atual, de acordo com a analogia entre os mapas das Figura 16-a e Figura 16-b, que não ilustram vulnerabilidades nesta subdivisão geográfica.

Este artigo reconhece o papel da Agricultura e da Pecuária na emissão de poluentes atmosféricos no Brasil, e especula a possibilidade desta fronteira agrícola do Matopiba, o oeste baiano, mais precisamente no mosaico de UCs do Jalapão, representado pelo município de Mateiros no Tocantins, ser a provável causa das mudanças desenhadas pelo modelo MIROC5 nesta microrregião. O mesmo pode-se dizer quanto a Campos Lindos. Ademais medidas devem ser efetuadas no caso de mantimento das propriedades agrícolas locais, com uso intensivo de sistemas de irrigação e outras tecnologias, como já explanado. Imagina-se também a possibilidade de que as menores CADs estimadas pela FPT entre 30 a 40 mm nesta área protegida em relação ao Estado, cuja média é de 40 a 50 mm, tenham agido como cocausadores destes ISNAs, assim como o regime de chuvas.

## 5.4 - Conclusões

Destaca-se que, de acordo com o clima atual, a maioria do território tocantinense apresenta baixo risco climático para o cultivo da soja durante todo o período de plantio analisado, ou seja, de outubro a janeiro. Contudo observa-se restrições médias ou elevadas, especialmente nas datas de plantio no início de outubro e final de janeiro.

As janelas de semeadura, definidas pelos dados de temperatura e precipitação médias decendiais para região norte do Estado do Tocantins, iniciam-se tardiamente, a partir do último decêndio de outubro e se prolonga até o final de janeiro. O sul do Estado possui sua produtividade ameaçada se os dias de semeadura forem atrasados, especialmente se realizados nos decêndios de janeiro. Já na porção central do Tocantins, observou-se baixo risco climático, sendo possível o crescimento deste sistema produtivo de outubro a janeiro.

As projeções do modelo MIROC introduzem riscos climáticos no Estado do Tocantins, que segundo o clima atual é em sua totalidade de baixa recorrência de deficiência hídrica, caracterizado pela frequência de 80% dos ISNAs maiores ou iguais a 0,65 na fase de floração à enchimento dos grãos em pelo menos uma época de plantio. As zonas de grande risco estimadas podem causar a evasão dos produtores de Campos Lindos e Mateiros, no Tocantins, primeiro e segundo município de maior produção em toneladas de grãos no Estado.

Tal comportamento pode mudar a fronteira agrícola para áreas estabelecidas de baixa possibilidade de deficiência hídrica, pressionando ambientes de alto valor ambiental, como as APAs da Ilha do Bananal/Cantão, da Serra do Lajeado e do Lago de Palmas, que não tiveram suas características climáticas prejudicadas pela prospecção do RCP 4.5 e fracamente afetadas em RCP 8.5. Neste último apenas as APAs da Ilha do Bananal/Cantão e da Serra do Lajeado apresentaram médio risco climático em 23,47 e 22,06%, respectivamente, de seus territórios. Estas novas perspectivas climáticas incitam a necessidade de um reforço das medidas de controle e de fiscalização em UCs por parte de alguns gestores públicos municipais e/ou de outras esferas governamentais.

## Referências Bibliográficas

- BARBOSA, V. S.; PELÚZIO, J. M.; AFFÉRI, F. S.; SIQUEIRA, G. B. Comportamento de cultivares de soja, em diferentes épocas de semeaduras, visando a produção de biocombustível. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 3, p.742-749, set. 2011.
- BARROS, H. B.; PELÚZIO, J. M.; SANTOS, M. M.; BRITO, E. L.; ALMEIDA, R. D. Efeitos das épocas de semeadura no comportamento de cultivares de soja, no sul do Estado do Tocantins. **Ceres**, Viçosa, v. 50, n. 291, p. 565-572. set. 2003.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Política Agrícola. **Portaria n.67, de 11 de julho de 2019**. Diário Oficial da União, n. 138, Seção1, p. 66, de 11 de julho de 2019.
- CHOU, SIN CHAN; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J.A. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512-527, 2014.
- COLLICCHIO, E.; ROCHA, H. R.; VICTORIA, D. C.; BALLESTER, M. V. R.; TOLEDO, A. M. A. Implicações das mudanças do clima no zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar no Estado de Tocantins, considerando o modelo GFDL. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife, v. 08, n. 06, p. 1730-1747, 2015.
- CORRÊA, M. F. et al. Efeito da irrigação por aspersão no rendimento e potencial fisiológico das sementes de soja. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 4, n. 18, p.482-488, jul. 2019.
- EVANGELISTA, B. A.; SILVA, F. A. M. da; SIMON, J.; CAMPOS, L. J. M.; VALE, T. M. do. **Zoneamento de risco climático para determinação de épocas de semeadura da cultura da soja na região Matopiba**. Brasília: Embrapa, 2017.
- FIDELIS, R. R.; SILVA, J. C.; PELÚZIO, J. M.; CAPPELLARI, D.; BARROS, H. B., CARVALHO, G. L. Performance de cultivares de soja, em diferentes épocas de semeadura na região sul do estado do Tocantins, safra 2006/07. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, Belém, v. 3, n. 5, p.163-175, 2007.

FÉLIX, A. S.; NASCIMENTO, J. W. B.; MELO, D. F.; FURTADO, D. A.; SANTOS, A. M. Análise exploratória dos impactos das mudanças climáticas na produção vegetal no Brasil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 13, n. 1, p.397-409, jan. 2020.

FURTADO, S. E.; CRISTO, S. S. V. Análise das Transformações Ambientais no Entorno do Parque Estadual do Lajeado, Palmas – Tocantins. **Geografia, Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 22, n. 13, p.1-11, 2018.

GAMBA, F.B.; COLLICCHIO, E. Cultivo da soja em áreas de entorno do Mosaico das Unidades de Conservação do Jalapão, na região do Matopiba. **Revista Liberato**. v. 19, n. 32, p. 179-190, out. 2018.

IBGE. **Produção agrícola municipal, culturas temporárias e permanentes, 2017**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 06 mar. 2019.

IPCC. **IPCC, 2014**: sumário para os tomadores de decisão do quinto relatório de avaliação (2014). Traduzido por Iniciativa Verde, São Paulo, 2015. Disponível em: [http://www.iniciativaverde.org.br/lib/php/download.php?cfg=1&arq=produtos/37\\_2015\\_05\\_04\\_relatorio\\_ipcc\\_portugues.pdf&mde=ProdItem&cod=37](http://www.iniciativaverde.org.br/lib/php/download.php?cfg=1&arq=produtos/37_2015_05_04_relatorio_ipcc_portugues.pdf&mde=ProdItem&cod=37). Acesso em: 04 abr. 2019.

LENDERINK, G. et al. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Science**, v. 11, n. 3, p. 1145-1159, 2007.

MAPBIOMAS - Projeto de mapeamento anual da cobertura e uso do solo no Brasil. **Coleção 4.0**. Disponível em: <http://mapbiomas.org/>. Acesso em: 23 jan.2020.

MONTEIRO, J. E. B. A.; NAKAI, A. M.; ASSAD, E. D.; PELLEGRINO, G. Q.; OLIVEIRA, A. F. de; PAVÃO, E. de M. Risco climático para soja no Brasil em cenários de mudanças climáticas no período 2011-2040. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 19., 2015, Lavras. **Anais...** Lavras, MG: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia - SBAGRO, 2015. p. 2422-2429.

MOREIRA, D.C.; COLLICCHIO, E. Prerrogativas da legislação ambiental estadual em relação à APA Ilha do Bananal/Cantão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 18, p. 197-211, 2017.

OLIVEIRA, G.G.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N.M. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo ETA CPTEC/HADCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio Ijuí, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, 101 - 121, 2015.

RODRIGUES, D. S.; SCHUCH, L. O. B.; MENEGHELLO, G. E.; PESKE, S. T. Desempenho de plantas de soja em função do vigor das sementes e do estresse hídrico. **Revista Científica Rural**, Bagé, v. 20, n. 2, p.144-158, ago. 2018.

SEPLAN, Secretaria do Planejamento do Estado do Tocantins. **Base de dados geográficos do Tocantins - atualização 2012**. Palmas: Seplan, 2012 (Base de Dados Geográficos).

SEEG - **Sistema de estimativas de emissões de gases de efeito estuda**. Disponível em: <<http://www.observatoriodoclima.eco.br/>>. Acesso em: 16 jan. 2020.

SILVA, R. A. e. **Impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade e pegada hídrica da soja cultivada na região do Matopiba**. 2018. 113 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2018.

SOUSA, D. R. N.; OLIVEIRA, M. L. R. Conflitos e desafios de populações tradicionais na Amazônia brasileira: o caso da Reserva Extrativista do extremo norte do Estado do Tocantins. **Revista Mundo Agrário**, La Plata, v. 18, n. 38, p.1-11, ago. 2017.

THORNTHWAITE, C.W. Na approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 26, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p. 1955.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n. 44, p. 892-898, 1980

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Guide to the global observing system**. n. 488, Genebra, Suíça. 172p. 2010.

ZANON, A. J.; SILVA, M. R.; TAGLIAPIETRA, E. L.; CERA, J. C.; BEXAIRA, K. P.; RICHTER, G. L.; DUARTE, A. J.; ROCHA, T. S. M.; WEBER, P. S.; STRECK, N. A. **Ecofisiologia da soja visando altas produtividades**. Santa Maria: Palloti/SM. v. 1. 2018. 136p.

## 6 - MODELAGEM DE DINÂMICA TERRITORIAL DA SOJA NO ESTADO DO TOCANTINS E EM SUAS UCs A PARTIR DE CENÁRIOS DE RISCOS CLIMÁTICOS

A soja é claramente uma das culturas agroenergéticas de maior oferta e procura na economia brasileira. Embora sejam constantemente examináveis inclinações positivas nas curvas de produtividade, as exigências por terras cultiváveis evoluem desenfreadamente. Este sentimento mercadológico inevitavelmente promove ações de desmatamento e agravos deletérios nos ciclos biogeoquímicos naturais, como no ciclo do carbono. Uma série de modelos ambientais, acoplados ou não, são utilizados para explicar esses fenômenos espaciais complexos, cujas variáveis se modificam espacialmente e temporalmente por diversos fatores, econômicos, sociais e naturais. Estas ferramentas de modelagem ambiental podem prever a dinâmica territorial a médio prazo, segundo um cenário previamente estabelecido, a partir da calibração dos modelos. Neste intuito, considerou-se o software DINAMICA EGO para prospecção do cultivo da soja em regiões onde localizam-se Unidades de Conservação (UCs) no Estado do Tocantins sob diferentes perspectivas de mudanças climáticas, segundo o modelo MIROC5. Os caminhos representativos simulados de emissões de gases de efeito estufa utilizados procedem das forçantes radiativas RCP (Representative Concentration Pathway) 4.5 W/m<sup>2</sup> e RCP 8.5 W/m<sup>2</sup>. Os cenários futuros do clima afetam invariavelmente na disponibilidade hídrica para a oleaginosa em estudo, medida por meio do Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA). Tais variações podem afetar as áreas mapeadas pelo zoneamento agrícola regional quanto à probabilidade de ocorrência de déficit hídrico. Este fenômeno gerou uma maior exploração dos recursos naturais nas APAs da Ilha do Bananal/Cantão, do Lago de Palmas e da Serra do Lajeado. Diagnosticou-se evasão de alguns centros produtores reconhecidos, como o município de Campos Lindos, e também uma maior preservação num futuro próximo do Mosaico de Unidades de Conservação do Jalapão, que se tornou de alto risco climático para os rendimentos em grãos de soja normalmente demandados pelo mercado, em ambos os cenários probabilísticos. Observou-se também uma crescente ocupação de uso, no centro do Estado, especialmente na microrregião de Porto Nacional, que praticamente dobrou a área de produção, com uma evolução média de 1% (equivalente a 266,35 milhares de ha) em 2019 para 2% (602,34 milhares de ha) em 2050 da área do Estado do Tocantins. Destaca-se que as distribuições de chuva e a CAD numa faixa de 50 a 60 mm sejam os componentes que traduzirão este baixo risco e provável procura pelo desenvolvimento da sojicultura nesta primeira metade do século XXI em todas as circunstâncias estimadas no espaço portuense.

**Palavras chave:** sojicultura; mudança do clima; modelagem;

## 6.1 - Introdução

O crescimento das taxas de demandas por exportação brasileira de grãos, farelos e óleos de soja (em média de 12% ao ano) entre 2007 e 2018 (ABIOVA, 2019), tem configurado o país num futuro próximo como expoente no mercado global desta cadeia produtiva. As expectativas em relação à indústria do biodiesel também demonstram o crescente interesse por esta oleaginosa em razão dos percentuais legislativamente atribuídos à comercialização dos combustíveis a diesel, mesmo ainda não havendo as políticas e estratégias de investimentos que alavanquem o processamento interno essencial para sua concretização, cujo avanço em mercantilização tem sido de 3% ao ano no período citado (GUIDUCCI; LAVIOLA, 2019).

A soma destas exigências de uma tipologia mista de consumidores pelo plantio desta cultura agroenergética, pode promover o desmatamento de formações naturais, uma consequente maior pegada de carbono e evidentemente contribuir para o desequilíbrio de sua ciclagem biogeoquímica. As mudanças climáticas, estimadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), têm retratado aumentos de temperatura e flutuações nas precipitações médias mensais em decorrência da emissão de gases de efeito estufa (GEE), que podem estreitar as zonas adequadas à evolução dos sistemas produtivos, expondo assim uma alarmante probabilidade de ocorrência de vulnerabilidades regionais em termos de produção (IPCC, 2014).

O produto interno bruto dos municípios publicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) aponta o Estado do Tocantins com um percentual de participação no valor deste indicador para a agropecuária a preços correntes de aproximadamente 13,48%, rendimento bruto em torno de R\$ 4.159.258,00, comparáveis a representatividade da indústria (14,72%) nos rendimentos estaduais. O Tocantins assim é a quinta unidade federativa (UF) que possui maior grau de participação no agronegócio em sua matriz de desenvolvimento regional, sendo que o primeiro é o Estado do Mato Grosso (IBGE, 2018).

Ambos os governos estaduais investiram significativamente na cultura da soja. Estima-se pela plataforma de produções agrícolas municipais (PAM) que no território tocantinense a soja é a cultura que mais gerou renda (63,27% da lucratividade) e também a que mais ocupou área (67,52% das terras plantadas) no ano safra de 2017/2018. As culturas de milho e arroz representam juntas 24,29% dos terrenos agrícolas e as demais culturas totalizam 8.19% (IBGE, 2018).

Embora aumentos relevantes de produtividade tenham sido alcançados em razão do melhoramento genético e do Zoneamento de Risco Climático estabelecido pelas portarias do

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2019), verifica-se ainda ampliações dos sistemas de produção em áreas anteriormente cobertas de vegetações naturais e habitadas por uma rica biodiversidade. Aguiar (2016) constatou esta reestruturação de usos, que se caracteriza pelo desmatamento e pelo consequente impacto na possibilidade de diversificação energética, na região do Matopiba, acrônimo que designa o território de logística infraestrutural voltada à agropecuária composta pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Dentre os cenários considerados, observou-se que mesmo com o cumprimento da Lei Federal nº 9.985/2002, de estabelecimento do sistema nacional de unidades de conservação ambiental, 14% da área estadual deverá ser desmatada até 2050 provavelmente para o desenvolvimento da sojicultura (AGUIAR, 2017).

Existem uma diversidade de modelos adotados para aferir a elasticidade dos atributos ambientais discretizáveis geograficamente ao longo do tempo. No entanto, são comumente reconhecidos os softwares de modelagem espacial LCM, CA\_MARKOV, CLUE-S e o DINAMICA EGO. Em todos existem exemplos para prospecção de atividades agrícolas ou dos demais usos gerenciados pelo planejamento territorial, bem como de variáveis para gestão de recursos hídricos (LACHER et al., 2018). Contudo, sabe-se que o DINAMICA EGO, desenvolvido pela Universidade Federal de Minas Gerais, possui maior recursividade do usuário e disponibilidade de parâmetros de entrada para o aprendizado estocástico do modelo que rege sobre o comportamento das mudanças de uso e ocupação (MAS et al., 2015).

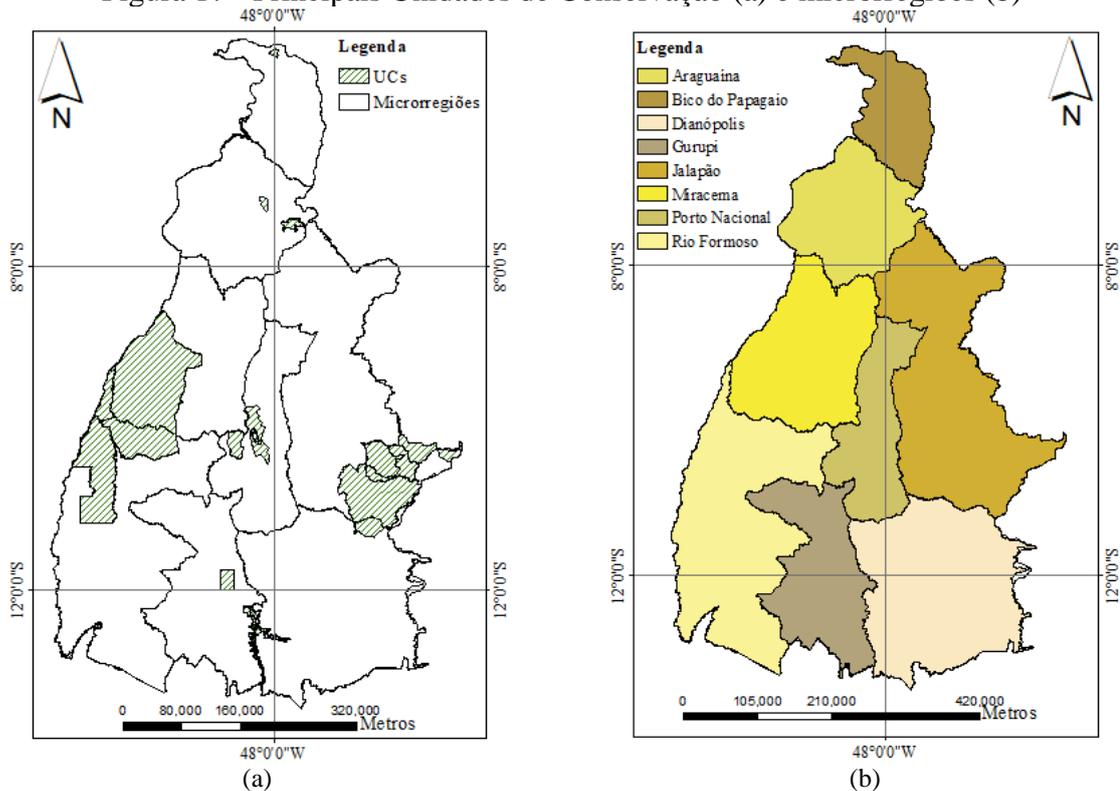
O presente estudo pretende modelar a dinâmica de crescimento das áreas de interesse de cultivo da soja em dois cenários climáticos futuros, um tendencial (RCP 4.5) e outro pessimista (RCP 8.5) em relação às mudanças do clima, estabelecidas pelo modelo MIROC5 do IPCC no Estado do Tocantins e em suas Unidades de Conservação, no período entre 2021 e 2050. A contabilização e representação temática da aproximação da fronteira agrícola em entornos das unidades de conservação será realizada por meio de um modelo ambiental elaborado na interface do software DINAMICA EGO. A confirmação destas projeções pode sugerir a urgência de criação de mecanismos para redução das emissões de dióxido de carbono orgânico equivalente (CO<sub>2</sub>e) da degradação dos recursos naturais, em contrapartida às legislações atuais.

## 6.2 - Material e métodos

A área de estudo é a unidade federativa do Tocantins, que se localiza a sudeste da grande região Norte do país, definido entre as latitudes  $05^{\circ} 10' e 06''$  e  $13^{\circ} 27' e 69''$  e longitudes  $45^{\circ} 41' 46''$  e  $50^{\circ} 44' 33''$ . Segundo o levantamento pedológico disponibilizado pela base de atualização da Secretaria de Planejamento do Estado – Seplan (TOCANTINS, 2012), o Estado do Tocantins possui em maior parte Plintossolos, que são conceitualmente conhecidos como de precária drenagem subsuperficial, abrangendo 35 % de seu território. Em contrapartida segundo a mesma fonte 20% de seu espaço é de Latossolos, bem drenados, o que pode permitir sua maior retenção de água.

Conforme diagnosticado por Collicchio et al. (2015) as temperaturas mais altas coincidem com os meses mais secos em torno de  $27,1^{\circ} C$  e as mais baixas são de  $24,7^{\circ} C$  em junho. O Estado do Tocantins, suas principais Unidades de Conservação, e suas microrregiões, são ilustradas pela Figura 17.

Figura 17 - Principais Unidades de Conservação (a) e microrregiões (b)



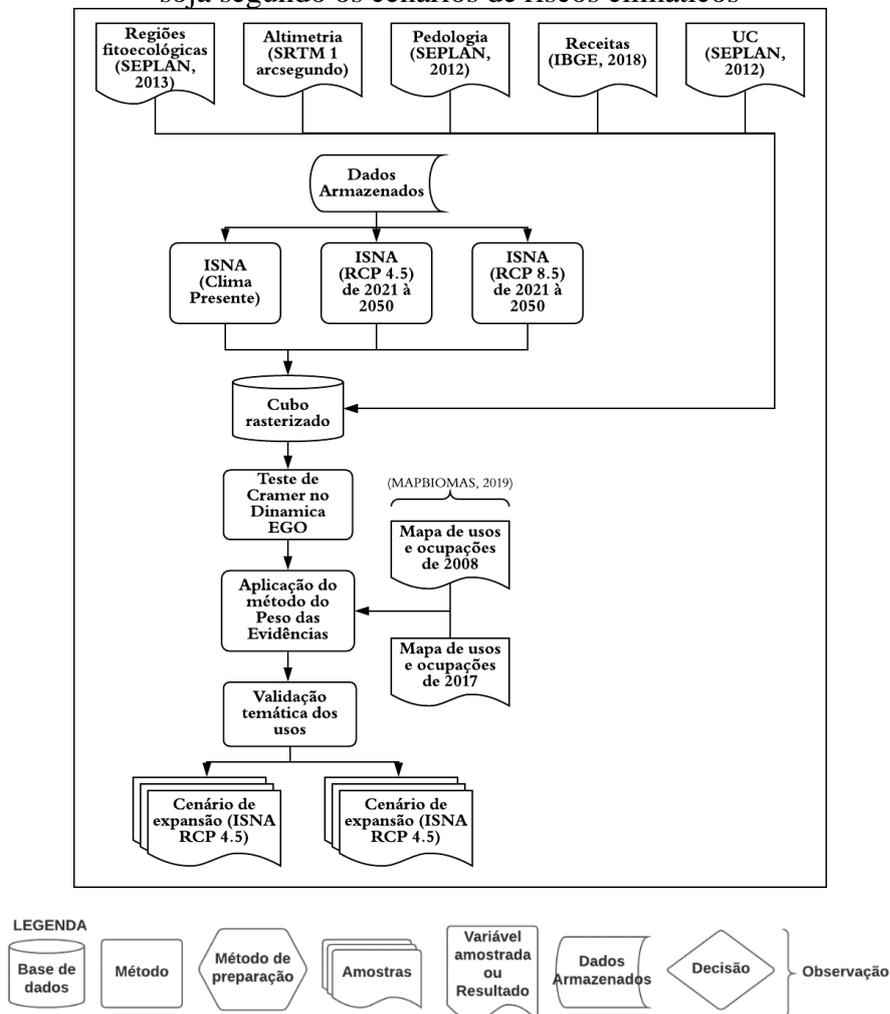
A Figura 18 mostra a organização de métodos, documentos e formas de armazenamento de dados trabalhados para criação de um modelo espaço temporal de avanço da cultura da soja entre 2021 à 2050 no Estado do Tocantins, e em regiões de Unidades de Conservação (UCs).

Este fluxograma em uma primeira linha expõe as variáveis estáticas utilizadas para cálculo dos pesos das probabilidades de transição da soja em áreas com vegetação e em áreas de pastagem.

O ícone que diz respeito a dados armazenados traz consigo os zoneamentos de risco climático fundamentados no capítulo anterior, composto pela tematização dos ISNAs, entre 2021 e 2050, para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, simulados pelo modelo MIROC5.

Para cada ISNA foram gerados mapas de dinâmica e de usos de ocupação, gamas de amostras armazenadas para cálculo de CO<sub>2</sub>e emitido pela devastação da sojicultura, nas UCs.

Figura 18 - Fluxograma da metodologia adotada para obtenção dos mapas de expansão da soja segundo os cenários de riscos climáticos



Em um primeiro momento foi realizado a montagem de um banco de dados geográficos para organizar alguns planos de informação fundamentais para discriminação das áreas cultivadas com soja no Estado do Tocantins. As variáveis econômicas e de desempenho da cultura por município foram selecionadas na plataforma Sidra, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), bem como as receitas das produções, e processadas para serem explicitadas geograficamente.

O mapa das classes pedológicas e geológicas foram adquiridos na Embrapa, e a matriz categórica de vegetação foi obtida do inventário florestal do Estado do Tocantins (Seplan, 2013).

O mapeamento das classes de altitude cujas derivadas parciais compõem o mapa das declividades foi extraído da interface Earth Explorer da Nasa e estão sob a resolução de 1 arc segundo (aproximadamente 30 metros de tamanho de pixel, escala espacial também adotada no presente projeto). Estes últimos dados se vincularam como entrada estática no modelo de mudanças de usos e ocupações, land-use and land-cover change (LUCC).

As camadas matriciais e vetoriais citadas anteriormente foram transferidas para um uma extensão de dados multidimensionais, denominado de cubo rasterizado, para facilitar a manipulação das várias variáveis cujos pesos de evidência nas transformações de terreno foram calculados e acessados pela interface do modelo. Aqueles que não se constituíram de dados temáticos, de declividade e das distâncias entre as classes de vegetação, de cultura anual e de pastagem, foram categorizados por intermédio de um método similar ao fatiamento de classes no próprio Dinamica EGO, durante a formatação dos intervalos das probabilidades de transição. Também se concretiza nesta etapa a correlação entre as variáveis escolhidas almejando eliminar qualquer redundância de orientação de pesos de evidências, requisito elementar para esta modelagem de autômatos celulares, pelo teste de Cramer, executado pelo Dinamica EGO (MAS et al., 2015).

Em seguida foi realizada a dinâmica de uso nos últimos dez anos do cultivo da soja no Estado do Tocantins e em regiões de UCs situadas neste território. Para tanto foram amostrados os mapas matriciais da plataforma MapBiomas em sua quarta coleção (MAPBIOMAS, 2020). Dentre eles, constam-se os usos e ocupações territoriais dos anos de 2008 a 2018. Verificou-se, portanto, as taxas líquidas e brutas de transição possíveis sobre as classes de transição que contribuem para degradação dos recursos ambientais. A classe de uso para Culturais Anuais, e Perenes, foi inteiramente aqui fundamentada como pertencente à cultura da soja, haja vista sua predominância em termos de produção e área, bem como o potencial desmatamento em relação às demais culturas.

Por último, procede-se a elaboração dos cenários de uso e ocupação da soja segundo os Índices de Satisfação de Necessidades das Águas (ISNA), derivados das forçantes do modelo climático regional MIROC5 com o auxílio do software de modelagem ambiental, Dinamica EGO. Este parâmetro é o resultado do zoneamento das simulações de cálculo de balanço hídrico para 36 datas de semeadura de 130 estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas, considerando um cultivar de ciclo de desenvolvimento médio, com coeficientes de cultivo similares aos referenciados por Evangelista et al. (2017), e utilizando-se de uma CAD estimada por meio de uma função de pedotransferência. As precipitações e temperaturas médias diárias observadas da ANA foram usadas para corrigir os cenários futuros RCP 4.5 e RCP 8.5, pelo método proposto por Lenderink et al. (2007).

A simulação do modelo de usos e ocupações do solo (LUCC) foi realizada considerando o período entre 2008 e 2018, sendo validado pelo ano de 2013, de modo a computar os referidos cenários vinculados pela calibração dos coeficientes dos pesos das evidências dos mapeamentos de riscos climáticos de desenvolvimento da soja. Esta redefinição, dos pesos medidos, torna as áreas de baixo ISNA, de maior risco climático, menos atrativas a implementações de cultivo.

Valores de similaridade acima de 0.5 foram suficientes para validar o modelo. Essa comparação foi realizada pela semelhança Fuzzy entre as células vizinhas dos dois mapeamentos, estimado e observado, segundo o método adaptado de Hagen (2003), do Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR/UFMG). Este processo de validação por decaimento constante avalia as distâncias entre o mapa da diferença do ano inicial (2008), com o ano em análise (2013), e o mapa de diferença deste primeiro período e o ano de 2013 simulado pelo Dinamica EGO.

A partir do inventário florestal do Estado do Tocantins realizado em 2012, foram obtidos os dados de estoque de carbono ( $t \cdot ha^{-1}$ ) e da biomassa, tanto aérea como subterrânea. Com essas informações, procedeu-se o cálculo de emissão de dióxido de carbono equivalente ( $CO_2e$ ) para as áreas espacializadas pela dinâmica como de transição da área de vegetação natural para a área potencialmente ocupada pelo plantio da soja no Estado e em regiões de Unidades de Conservação. O gás carbônico equivalente foi definido pela multiplicação do estoque de carbono consumido na área desmatada pela fronteira agrícola pela razão entre as massas atômicas do  $CO_2$  e do carbono, 44/12 (SALMONA; PAIVA; MATRICARDI, 2016). Estas variações de espaço foram mensuradas pelo método de *overlay mapping*, disponibilizado por um Sistema de Informações Geográficas.

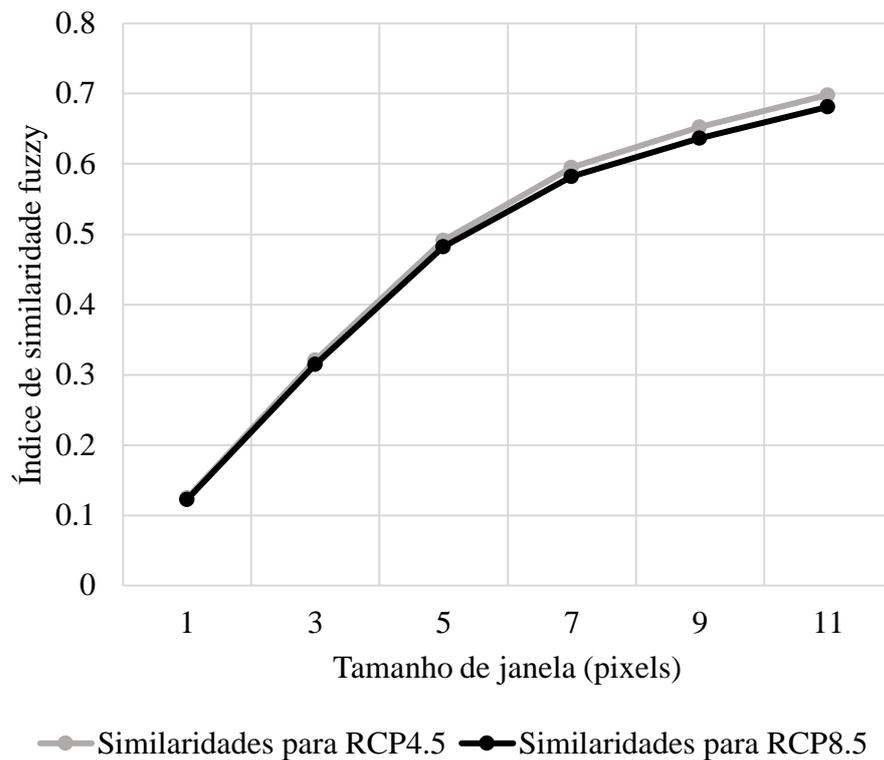
### 6.3 - Resultados e Discussão

Após a calibração do modelo, o grau de similaridade mínimo observado no mapa de comparação entre as diferenças observadas e simuladas, pelo método adaptado de Hagen (2003), foi de 0,70 para a modelagem que envolveu como variável estatística o ISNA do RCP 4.5 e 0,69 para o LUCC que utilizou de RCP8.5, para um tamanho de janela comparativa de 11x11 pixels de resolução. Este valor encontrado, para a análise das 11x11 células que circunscrevem uma célula central, está acima do que é normalmente empregado como padrão de aceitabilidade, que se encontra entre 45 a 50% de semelhança.

Para resolução de validação de 5x5 foram estimados 0,49 e 0,48, para RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. Estes resultados validam o comportamento do desmatamento pela cultura da soja, em caso de se configurar e de se aceitar o zoneamento de risco climático previsto por estes cenários.

A Figura 19 ilustra os coeficientes de similaridade expostos pelo Dinamica EGO. Nota-se uma certa semelhança entre as perspectivas adotadas para as janelas de tamanho abaixo de 0,5. Acima deste valor, observa-se uma ligeira diferença que caracteriza maior similaridade para a forçante RCP 4.5 em relação ao outro cenário, relativamente pessimista. Isto provavelmente se deve ao fato de que o RCP 4.5 está mais condizente com o atual panorama de investimentos na sojicultura, que isenta todo o Estado do Tocantins da recorrência de deficiência hídrica prejudicial à produtividade da soja, em sua fase fenológica de reprodução (floração à enchimento dos grãos).

Figura 19 – Índices de similaridade Fuzzy entre os mapas de diferenças simuladas e observadas para diferentes tamanhos de janelas e cenários de expansão da soja no Estado do Tocantins

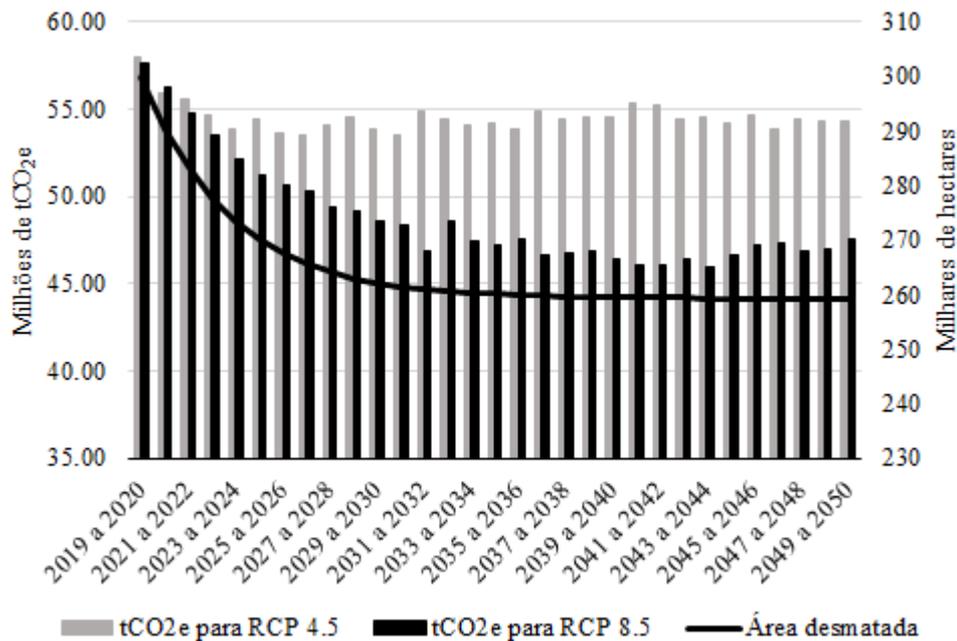


O sistema produtivo da soja avançou em 29,54% das áreas de vegetação natural no território tocantinense em ambos os cenários estudados. No entanto, para um cenário tendencial de riscos climáticos (RCP 4.5), menos restritivo em termos de áreas passíveis de exequibilidade do empreendimento da soja, emitiu CO<sub>2</sub>e mais do que para o RCP 8.5. Assim sendo, do ponto de vista ambiental, o estreitamento das faixas com baixos ISNA vem a consolidar uma perspectiva de menor pegada de carbono, e conseqüente menor degradação do ciclo biogeoquímico do mesmo no Tocantins.

A Figura 20 demonstra que as taxas de desmatamento diminuem e se estabilizam em 2040 em 260 mil hectares até o final do horizonte de tempo definido. Para o RCP 8.5 esta diminuição acompanha a retração das emissões de CO<sub>2</sub>e, ao contrário do que ocorre para o cenário RCP 4.5. Beuchle et al. (2015) também caracterizaram esta retração em taxa, postando que este valor caiu de 1.294,9 para 1.181,2 milhares de hectares por ano entre os anos de 2000 e 2010 no bioma Cerrado. O MMA (2009) deferiu um valor próximo de 1.250.000 ha/ano.

Com base nestas referências, o Tocantins se responsabiliza por aproximadamente 20,8% das perdas fitofisionômicas deste bioma. Carneiro Filho; Costa (2016) e Bolfe et al. (2017) também atestam este parecer para o Matopiba e para o Tocantins, respectivamente.

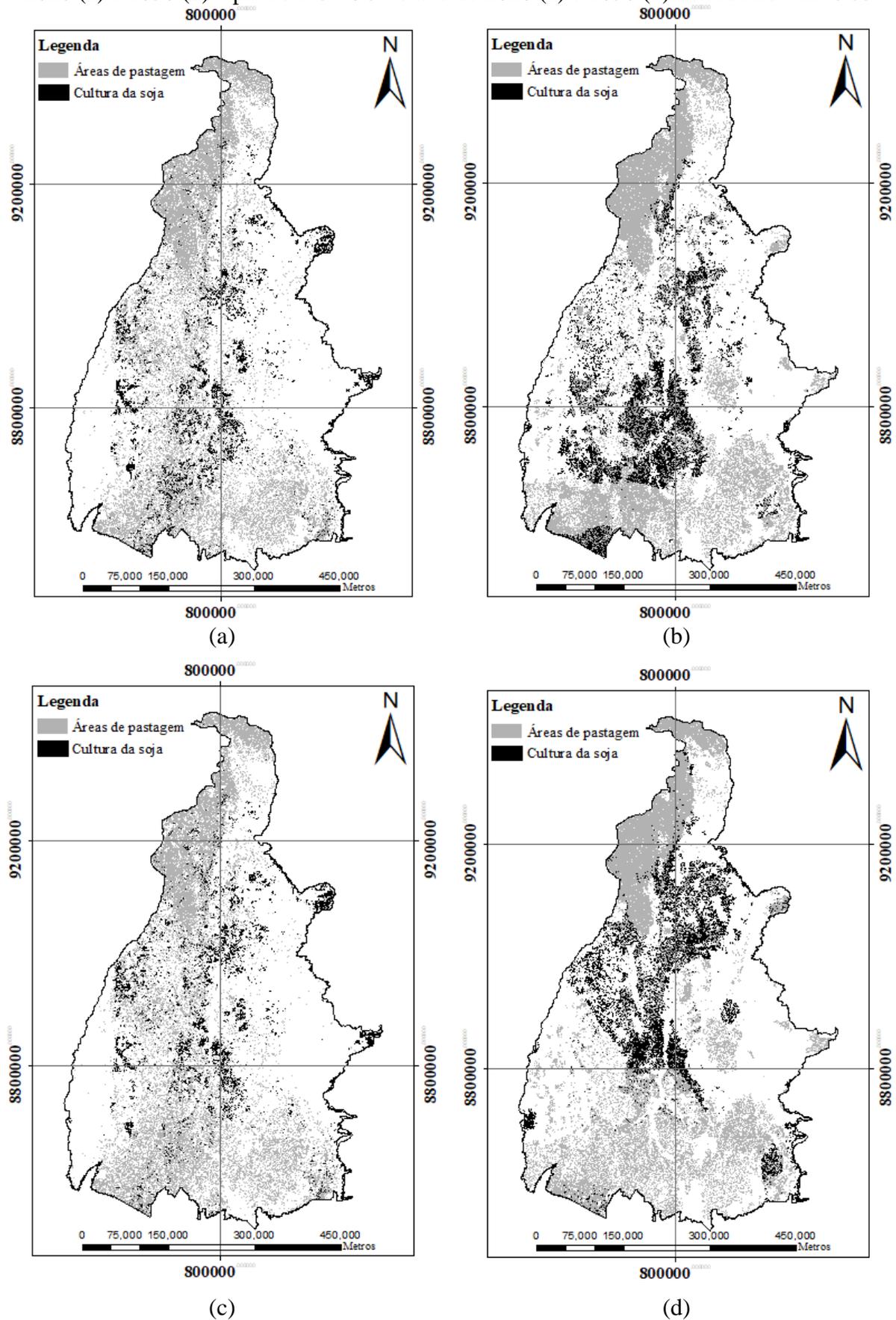
Figura 20 - Emissões acumuladas de CO<sub>2</sub>e por cenário climático e área desmatada acumulada entre 2009 e 2050



A Figura 21 faz os comparativos de usos e ocupações entre os anos simulados de 2020 e 2050 pelo Dinamica EGO. As Figuras 21-a e 21-b, que mostram a evolução da soja para o cenário RCP 4.5 do modelo MIROC5, demonstram que uma versão mais otimista das distribuições de disponibilidade hídrica no Estado, no futuro delineado, causa uma competitividade por área no centro sul desta unidade federativa. Em RCP 4.5, a microrregião do Jalapão, que possui produções agrícolas municipais significativas para esta espécie analisada, de acordo com as estatísticas do IBGE (2018), sofrerá perdas de áreas plantadas com soja, em torno de 99% entre 2019 e 2050. O Bico do Papagaio, para esta diretriz de mudança climática, não terá percentuais de áreas que caracterizam agricultura intensiva. Isto evidencia a necessidade de procura por infraestrutura no centro sul e oeste tocantinense.

Corroborar ainda mais com esta última afirmação, a participação da microrregião do Formoso, que contém parte da APA da Ilha do Bananal/Cantão. A mesma terá seu empreendimento agrícola quatro vezes maior no final do período, superando em crescimento as demais microrregiões nesta cadeia produtiva e representando 2,56% do limite estadual.

Figura 21 – Estimativa da cultura da soja no Tocantins para o cenário RCP 4.5 no ano de 2020 (a) e 2050 (b) e para o RCP 8.5 no ano de 2020 (c) e 2050 (d) do modelo MIROC5



Porém esta orientação na disposição de plantio poderá ser mudada, se estabelecido um ISNA de 80%, obtido pelas simulações de balanço hídrico da cultura com dados pluviométricos e de evapotranspiração potencial corrigidos do modelo MIROC5 no RCP 8.5. Neste novo cenário o Bico do Papagaio sofrerá um pequeno aumento de 66,66% em área plantada entre 2019 a 2050. Conforme Figura 21-d, a maior porcentagem de áreas relatadas nesta microrregião se concentrará nos municípios de Araguatins e São Bento do Tocantins, que se encontram na transição do Cerrado para a Amazônia. A sobreposição entre as Figura 21-c e Figura 21-d mostra também um avanço na microrregião de Araguaína, que teve a maior ocupação da soja nos trinta anos posteriores à 2019 (quase quintuplicando sua área entre 2019 e 2050, adição de 370,67%).

Esta dinâmica superou as evoluções da agricultura nas demais regiões administrativas, ratificando a expansão em direção ao bioma amazônico. Moura; Vitorino; Adami (2018) provaram que a componente principal formada essencialmente pela relação entre os índices de oscilações oceânicas do Sul e as variáveis climáticas foi a que melhor explicou, comportando o maior percentual de variâncias, o regime pluviométrico da Amazônia Legal. Os coeficientes espaciais deste modo da análise estatística relataram visualmente precipitações médias anuais maiores no Sudeste desta marcação legal. Imagina-se que o fenômeno convectivo da Zona de Convergência do Atlântico Sul tenha gerado esta distribuição de chuvas que impactam positivamente na indústria da soja, cujas produtividades foram temporalmente bem correlacionadas a esta variabilidade pluviométrica (MOURA; VITORINO; ADAMI, 2018).

A subdivisão geográfica de Miracema do Tocantins, que num cenário RCP 4.5 expandiu sua área em 54,21%, no RCP 8.5 adquiriu 252,82% a mais em relação a 2019 de terras plantadas. Este desvio comportamental prova que o centro norte do Tocantins será mais privilegiado num futuro prospectado crítico, com menores índices pluviométricos (redução de 15% em relação ao clima atual) e altas faixas termais, com acréscimo de até 3°C de acordo com Chou et al. (2014), como ilustrado pela Figura 21-d.

Cabe a observação de que a microrregião do Jalapão que abriga um conjunto de Unidades de Conservação teve suas superfícies lavradas com a dicotiledônea em tematização desfeitas em 8,89% entre 2019 e 2050, no cenário RCP 4.5, o que é perceptível na Figura 21-b no extremo leste da UF. Mas quando ostentado pela ótica de reflexão de gases de efeito estufa em 8.5 W/m<sup>2</sup> a microrregião inclui em sua produção 64,25% de terras. No RCP 8.5 então vincula-se um desligamento das atividades agropecuárias em Mateiros e Campos Lindos para

uma formação de manchas de cultura anual em uma margem bem definida entre o sul do município de Rio Sono e o norte de Novo Acordo.

Os municípios de Mateiros e Campos Lindos, pertencentes à microrregião do Jalapão, são o primeiro e o terceiro pólo agrícola do Estado, pelo indicativo de número de plantações em ha do sensu oficial, organizado pelo Conselho Nacional de Abastecimento (Conab) e detalhado pelo IBGE. Estes mesmos serão fortemente afetados pelo clima nesta modelagem proposta. Campos Lindos perderá 93,42% de sua área se validada a projeção climática do modelo MIROC5 com RCP 4.5, terminando 2050 com 5224 ha. Conquanto Mateiros, que teve a segunda maior receita em produção de soja em 2018, dissolverá 70,43% de seus domínios de soja, sendo que essa perda será mais ampla se o cenário fosse RCP 8.5, perto de 84,98% de sua superfície semeada. Vale ressaltar que o município enquadra boa parte do mosaico de UCs do Jalapão dentro da UF em caracterização.

Se, no entanto, as estratégias públicas de gestão das emissões de CO<sub>2</sub>e se mostrarem completamente ineficientes, como o enunciado por uma refletância radiativa de 8.5 W/m<sup>2</sup>, outros dois grandes mercados irão se desfazer gradativamente, sendo eles os municípios de Peixe (-0,81%) e Lagoa da Confusão (-0,97%). O único município beneficiado pelos dois modelos LUCC executados é o de Porto Nacional, que atualmente é o quarto no ranking municipal de áreas plantadas em 2018 e a oitava economia do Estado no setor.

A resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) de nº 428/2010 estabelece um entorno de 3000 metros a ser preservado das Unidades de Conservação, caso não seja definida esta margem nos planos de manejos destas áreas, conhecida como zona de amortecimento. Este valor é emplacado para empreendimentos potencialmente poluidores, que geram grande impacto à biodiversidade a ser protegida. Supondo que este limite tenha sido adotado para a APA da Ilha do Bananal/Cantão, definida por lei estadual de nº 907 de 20 de maio de 1997, a dinâmica de usos demonstrou que 46,95% do Entorno será desmatado, segundo o caminho representativo normal, com taxas variando entre 0,9% em 2019 e 2,14% em 2050, conquanto para RCP 8.5 prevê-se um desmatamento em torno de 68,96%, recessão natural de 1,07% a 2,57% no mesmo período. A ausência de uma proteção integral exposta pela lei e as prerrogativas criadas nas legislações nesta APA constatadas por Moreira; Collicchio (2017) sustentam a possibilidade destes índices num futuro próximo.

Não somente o entorno da APA da Ilha do Bananal/Cantão foi prejudicado pelas projeções elaboradas. A mesma terá sua taxa anual de supressão de área vegetada crescendo linearmente de 1,26 a 3,38 % nos próximos 30 anos. Isto confere uma ocupação das lavouras de soja de 12,87% da APA no ano de 2050, com maior registro em 2030 de aproximadamente

22,11% de terras agrícolas, para as faixas temáticas de ISNA exploradas pelas precipitações e temperaturas médias do modelo MIROC5, RCP4.5. Estes números são similares ao cenário proposto por Aguiar (2016) no Estado do Tocantins, que descaracteriza a eficiência de aplicação da Lei 9.985 de 18 de julho de 2000, referente ao Sistema Nacional de Unidades de Conservação. Em uma circunstância futura mais problemática em concentração de gases do efeito estufa, RCP 8.5, os ISNAs gerados preveem acréscimos nestas taxas anuais, que reduzem as formações naturais, de 1,58 a 4,30%. Isto depõe que a soja ocupa em 2019 cerca de 7,16% da Ilha em 2019 e 22,72% em 2050.

Estima-se que sejam emitidos entre 0,21 a 0,47 milhões de tCO<sub>2</sub>e por ano nas duas perspectivas de mudanças climáticas avaliadas no entorno desta Unidade de Conservação. Na delimitação da Ilha do Bananal destinada a fiscalização dos órgãos ambientais para um desenvolvimento sustentável da região, verificou-se que em 2019 ocorrerá 11,93% das emissões estaduais, e em 2050, 28,37% do que é emitido será de responsabilidade desta APA.

À medida em que se propõe um zoneamento de risco climático com maiores restrições em disponibilidade hídrica, devido a prospecção de aumentos significativos da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, estes percentuais aumentam, devido a maior exploração dos recursos naturais pela atividade agrícola nesta unidade de Conservação. Assim para a forçante 8.5 foram expressos valores de emissão anual de CO<sub>2</sub>e entre 14,81 e 40,34% do CO<sub>2</sub>e da presente unidade federativa. Este estudo assim provoca as entidades governamentais para o incentivo à adoção de sistemas de irrigação e de outras abordagens técnicas, científicas e epistemológicas que incentivem o produtor a não prospectar novas áreas em face da deficiência hídrica, bem como em redefinir as políticas de proteção do meio ambiente desta Unidade, caso contrário estes cenários serão realísticos.

Outras áreas de proteção ambiental possuirão a mesma conduta anotada anteriormente, de ampliação das quotas de áreas plantadas ao longo dos próximos anos, independente do cenário estruturado. Entretanto estes valores não serão tão expressivos quanto para a APA da Ilha do Bananal. Cita-se por exemplo a APA da Serra do Lajeado, definida pela Lei Estadual nº 906 de 20 de maio de 1997, que abriga o Parque Estadual do Lajeado, resultante da criação da Usina Hidrelétrica Luiz Eduardo Magalhães, de Lajeado, incluindo a capital do Estado do Tocantins, Palmas. Entre os anos de 2019 e 2020 julgou-se que foram devastados 756 hectares (0,61 % da área da APA) e que nos últimos anos, entre 2049 e 2050, esta taxa alcançou 0,91%, devastando 1124 ha. Serão assim acumulados durante os trinta anos o desmatamento de equivalente a 20,66% da APA, uma média de 819 ha por ano. Se consideradas mudanças climáticas mais intensas (RCP 8.5) a situação se modifica radicalmente, se confrontada com a

conjectura positivista, conforme diagnosticado por teste t de Student a 1% de significância, exibindo uma média no mesmo intervalo de tempo de 1022,97 ha por ano, degradando o equivalente a 25,82% da APA.

Na APA da Serra do Lajeado, são consagradas duas zonas de gestão, uma de preservação e outra de conservação. As zonas de preservação são conhecidas como aquelas de declividade média relativamente alta, ambientes vulneráveis a degradação. O modelo LUCC aqui divulgado pelo Dinamica EGO apresentou pesos de evidências negativos para declividades gradualmente superiores a 5%, no que diz respeito ao avanço da soja nas demais fitofisionomias avaliadas (áreas de vegetação e de pastagem). Tais influências foram mantidas durante o processo de calibração, que variou apenas as forças das probabilidades de transição para variável estática do zoneamento de risco climático (os ISNAs do RCP 4.5 e 8.5).

O planejamento citado confere uma área de zona de uso intensivo de 35.607,68 ha, quase 32,34% da área total zoneada para fins protecionistas, sendo que a máxima ocupação diagramada à médio prazo (2020 a 2050) será de 5.576 ha (4,54%) para RCP 4.5 e 6.980 ha (5,68%) para RCP 8.5. Somado a outros usos não intensivos, de caráter familiar e de usos especiais, porém não preservacionistas, e sim com viés de desenvolvimento sustentável, tem-se que 74,49% da APA encontra-se suscetível a investimentos agrícolas, o que justifica os crescimentos da sojicultura nesta região mesmo que conceituada como Unidade de Conservação. O percentual restante de área (praticamente um quarto da unidade) pertence a subzona Serrana, enquadrada na zona de preservação integral (TOCANTINS, 2003).

No mesmo ritmo que a APA da Serra do Lajeado, a APA do Lago de Palmas, capital do Estado do Tocantins, definida pela lei estadual de nº 1098 de 20 de outubro de 1999, terá para um cenário pessimista uma maior concentração de usos da soja, 17,16% em 2019 e 55,97% em 2050 de sua área total, do que para a perspectiva de médias emissões de CO<sub>2</sub> (RCP 4.5), 15,30% em 2019 e 47,85% em 2050. Este acréscimo de área ocupada pela soja, com diferença significativa calculada pelo teste t de Student, não é correlacionada positivamente ao desmatamento para esta região especificada. Isto sugere uma presença mais acentuada de áreas de pastagem, e sua movimentação para fins agroindustriais. A subtração de áreas vegetadas teve taxas anuais oscilando entre 1,76 a 4,17% para ambas as projeções. Assim sendo as emissões de CO<sub>2</sub> serão próximas estatisticamente por parte do sistema produtivo em escrutínio, e podem representar uma máxima de 0,96% das emissões estaduais no final da primeira metade do século XXI. A demanda agrícola na zona de amortecimento de 3000 metros, estabelecida pela resolução CONAMA, há de pressionar o agronegócio na APA do Lago de Palmas. Simula-se

que quase 40,4% de sua área de entorno será empregada na agricultura em 2050, segundo RCP 8.5.

Constatou-se algumas APAs, como a APA do Lago do Peixe Angical, definida pela Lei de nº 1.444 de 18 de março de 2002, que terão percentuais de áreas de soja reduzidas nos anos seguintes. Não se observou nenhum desmatamento simulado nesta área para produção desta cultura de ciclo anual. Estima-se pelos dois cenários de emissões de poluentes atmosféricos que em 2019 estarão presentes na economia desta APA 12 ha de terras plantadas, que deixarão de existir nos meados dos anos 30 deste século. Esta área é menor do que a área mínima de 50 ha, e, portanto, pode ser entendida como de agricultura extensiva.

Outro exemplo de declínio das áreas de soja nas Unidades de Conservação está no mosaico de unidades de conservação do Jalapão, que compõe as seguintes UCs dentro do estado do Tocantins: APA da Serra da Tabatinga, Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba, Parque Estadual do Jalapão, Estação Ecológica Federal Serra Geral do Tocantins e APA do Jalapão. Esta discordância era esperada dados os mapeamentos derivados das simulações de cálculo do balanço hídrico, os ISNAS do RCP 4.5 e 8.5. Estes indicadores refletiram um risco relativamente alto para o plantio da soja neste complexo de áreas de interesse ambiental, o que poderia destacar uma certa fuga de investimentos. Esta evasão, observável nas Figura 21-b e Figura 21-d no município de Mateiros, extremo leste do Estado acontece diferentemente para cada visão de futuro apresentada.

O mosaico do Jalapão teve área antropizada pelo cultivo da espécie de 28.608 ha em 2019 (2,67% das UCs referidas acima). No RCP 4.5 essa área decresce para 5.344 ha (0,50% das UCs) em 2050 e para RCP 8.5 chega a 340 ha (0,03% das UCs). As tensões exercidas pela agricultura no Entorno destas Unidades também diminuirão em 44,08% de áreas plantadas, no RCP 4.5 e 73,56% para RCP 8.5. Deste modo as taxas de remoção da cobertura vegetal encolherão linearmente de 2.172 ha para 908 ha por ano durante a primeira metade do século XXI, no cenário de reflexão da radiação estabilizada em 4.5 W/m<sup>2</sup>. Estes índices impuseram a taxa de emissão de 0,11% de CO<sub>2</sub>e em 2019 e 0,05% em 2050. Para a forçante de 8,5 W/m<sup>2</sup> refletidos de radiação no modelo MIROC5, todavia, foi encontrada a mesma depreciação de taxa, contudo com resultados menos expressivos do que os de RCP 4.5, com médias anuais diferentes a 1% de significância.

Os modelos de usos e ocupações aqui conduzidos para diferentes cenários de expansão da oleaginosa de maior representação mercadológica na produção de biocombustível no país não contemplam a valoração dos seus rendimentos potenciais em grãos por hectare. Ou seja, foram propostas taxas líquidas de transição idênticas para estas prospecções simuladas.

Recomendam-se futuros trabalhos com essa diretriz de investigação das prováveis produtividades alcançadas no futuro para estas diferentes estações pluviométricas, estratégicas da construção do ZARC estimado a médio prazo. A presente sugestão vem a aprimorar o vislumbre da dinâmica de ocupação pela diferenciação desta taxa de aumento da área plantada, teoricamente expondo horizontes mais conservacionistas. Isto também auxiliaria na identificação dos créditos de carbono pela implementação destes empreendimentos agrícolas durante a linha de tempo definida para esta análise prospectiva.

#### **6.4 - Conclusões**

Os caminhos representativos do clima do modelo MIROC5 favoreceram a construção de frequências de ISNAs diferenciados do clima tocantinense atual e que puderam prognosticar perspectivas diferentes de avanços das fronteiras agrícolas nas unidades de conservação. Destaca-se principalmente a APA da Ilha do Bananal/Cantão, cuja tendência de emissões de CO<sub>2</sub>e pelo desmatamento para consolidação do plantio da soja cresceu substancialmente à medida em que foram consideradas transformações climáticas mais intensas no Estado. Compreende-se pelas ilustrações apresentadas que o alto risco climático no centro sul e no oeste do Estado compeliram os sistemas produtivos a crescerem em direção ao bioma amazônico, especialmente no Norte desta área de proteção citada em RCP 8.5.

Embora as variações nos zoneamentos de riscos climáticos imputem certa pressão em algumas UCs e nos seus entornos, outras tiveram seus fundamentos de preservação declarados pela Lei Federal de nº 9.985/ potencializados pelas mesmas. O mosaico do Jalapão e a APA do Lago do Peixe Angical possuíram retração da ocupação da soja nos seus interiores e em suas zonas de amortecimento. O complexo de áreas protegidas na microrregião do Jalapão apresentou taxas decrescentes de desmatamento e emissão de CO<sub>2</sub>e. O distanciamento de empreendimentos agrícolas deste mosaico citado se deu evidentemente pelas características físico hídricas do solo, relativamente baixas, e do regime de chuvas médias anuais, que conjuntamente deflagraram ISNAs pouco interessantes aos rendimentos característicos dos grupos de cultivares de desenvolvimento médio.

Constatou-se também que as mudanças climáticas trarão grandes prejuízos econômicos aos maiores produtores municipais do Estado do Tocantins. Destaca-se uma evasão em ambos os cenários de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera da cultura da soja nestas duas entidades político administrativas. Medidas de adaptação, como monitoramento das deficiências hídricas nas fases fenológicas de interesse, melhoramentos genéticos e

implementação de métodos e maiores gastos em irrigação devem ser tomadas. A resiliência nestas regiões pode reverter este cenário de expansão e devastação da natureza em outros ecossistemas do Estado que são de grande valor em biodiversidade.

## Referências Bibliográficas

ABIOVE. Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. **Estatística mensal**. 2019. Disponível em: <<http://abiove.org.br/estatisticas/>>. Acesso em: 16 fev. 2020.

AGUIAR, A. S. **Modelagem da dinâmica do desmatamento na região do Matopiba até 2050**. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

BOLFE, E. L. et al. MATOPIBA: análise do uso da terra e a produção agrícola. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2017, Santos. **Anais...** Santos: INPE, 2017.

BEUCHLE, R.; GRECCHI, R.C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116–127, 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Política Agrícola. **Portaria n.67, de 11 de julho de 2019**. Diário Oficial da União, n. 138, Seção1, p. 66, de 11 de julho de 2019.

CARNEIRO FILHO, A.; COSTA, K. **A expansão da soja no Cerrado: caminhos para a ocupação territorial, uso do solo e produção sustentável**. São Paulo: Agroicone, Input, 2016. 30p. Projeto Iniciativa para Uso da Terra (INPUT), Agroicone. Relatório. Disponível em: <[https://www.inputbrasil.org/wp-content/uploads/2016/11/A-Expans%C3%A3o-da-Soja-no-Cerrado\\_Agroicone\\_INPUT.pdf](https://www.inputbrasil.org/wp-content/uploads/2016/11/A-Expans%C3%A3o-da-Soja-no-Cerrado_Agroicone_INPUT.pdf)>. Acesso em: 6 fev. 2020

COLLICCHIO, E.; ROCHA, H. R.; VICTORIA, D. C.; BALLESTER, M. V. R.; TOLEDO, A. M. A. Implicações das mudanças do clima no zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar no Estado de Tocantins, considerando o modelo GFDL. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife, v. 08, n. 06, p. 1730-1747, 2015.

EVANGELISTA, B. A.; SILVA, F. A. M. da; SIMON, J.; CAMPOS, L. J. M.; VALE, T. M. do. **Zoneamento de risco climático para determinação de épocas de semeadura da cultura da soja na região Matopiba**. Brasília: Embrapa, 2017.

GUIDUCCI, R. do C. N.; LAVIOLA, B. G. Cenários de ampliação da demanda de biodiesel e processamento de soja no Brasil. In: Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação de Biodiesel, 7., 2019, Florianópolis. Empreendedorismo e inovação: construindo um futuro competitivo para o biodiesel: **Anais...** Florianópolis: Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação de Biodiesel, 2019. 871-872.

HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **Int. J. Geogr. Inf.Sci.**, v. 17, p. 235–249. 2003.

IBGE. **Produto interno bruto dos municípios, 2002-2017**. Rio de Janeiro: IBGE. 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pib-munic/tabelas>>. Acesso em: 13 dez. 2019.

IBGE. **Produção agrícola municipal, culturas temporárias e permanentes, 2018**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 12 dez. 2019.

IPCC. **IPCC, 2014**: sumário para os tomadores de decisão do quinto relatório de avaliação (2014). Traduzido por Iniciativa Verde, São Paulo, 2015. Disponível em: [http://www.iniciativaverde.org.br/lib/php/download.php?cfg=1&arq=produtos/37\\_2015\\_05\\_04\\_relatorio\\_ipcc\\_portugues.pdf&mde=ProdItem&cod=37](http://www.iniciativaverde.org.br/lib/php/download.php?cfg=1&arq=produtos/37_2015_05_04_relatorio_ipcc_portugues.pdf&mde=ProdItem&cod=37). Acesso em: 04 abr. 2019.

LACHER, I. L. et al. Scale-dependent impacts of urban and agricultural land use on nutrients, sediment, and runoff. **Science of the Total Environment**, Virginia, p.611-622, set. 2018.

LENDERINK, G. et al. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Science**, v. 11, n. 3, p. 1145-1159, 2007.

MAPBIOMAS - Projeto de mapeamento anual da cobertura e uso do solo no Brasil. **Coleção 4.0**. Disponível em: <http://mapbiomas.org/>. Acesso em: 23 jan.2020.

MAS, J. F. et al. Inductive pattern-based land use/cover change models: a comparison of four software packages. **Environmental Modelling & Software**, v. 51, p.94-111, jan. 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2009. **Relatório técnico de monitoramento do desmatamento no Bioma Cerrado, 2002 a 2008**: dados revisados [online]. Brasília: MMA. 75 p. Disponível em: <<http://mma.gov.br>>. Acesso em: 12 mar. 2020.

MOURA, M. N.; VITORINO, M. I.; ADAMI, M. Análise de componentes principais da precipitação pluvial associada à produtividade de soja na Amazônia legal. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 574-588, 2018.

SALMONA, Y. B.; PAIVA, A. O.; MATRICARDI, A. Estimativas futuras de desmatamento e emissões de CO<sub>2</sub> equivalente no Oeste baiano. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 7, p.1385-1395, 2016.

Secretaria do Planejamento do Estado do Tocantins (Seplan). **Base de dados geográficos do Tocantins**: atualização 2012. Palmas: Seplan, 2012 (Base de Dados Geográficos).

Secretaria do Planejamento do Estado do Tocantins (Seplan). Superintendência de Planejamento e Gestão Central de Políticas Públicas. Diretoria de Zoneamento Ecológico-Econômico (DZE). **Mapeamento das regiões fitoecológicas do estado do Tocantins**. Palmas: Secretaria do Planejamento do Estado do Tocantins, Diretoria de Zoneamento Ecológico-Econômico, 2013.

TOCANTINS. **Plano de Manejo da APA Serra do Lajeado**. Palmas: Naturatins. 2003. 37 p.

## 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ausência de atributos físico-hídricos, químicos e biológicos medidos dos solos no território tocantinense induzem a construção de equações de pedotransferência. A regressão linear obtida apresentou coeficientes estatísticos e medidas tendenciais de erro ótimos, os quais a justificam para fins de valoração da disponibilidade hídrica total de água (DTA) armazenada no solo em escala regional. Os resultados deste trabalho delinearão tematicamente o sudeste do Estado, mais especificamente em sua microrregião do Rio Formoso, com as maiores faixas de Capacidade de Água Disponível (CAD) para a cultura da soja.

Os Zoneamentos de Riscos Climáticos atualmente desenvolvidos para a cultura da oleaginosa em caracterização, elaborados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e pela Embrapa, discriminam em todo o estado do Tocantins ao menos uma época de semeadura com baixa probabilidade de deficiência hídrica. Este parecer é ratificado por este estudo. No entanto, quando as características climáticas são estimadas para um futuro a médio prazo (entre 2021 e 2050) há a inserção de regiões geográficas com alto e médio risco climático para qualquer data de plantio. Estas mudanças climáticas regionais podem desvincular os maiores produtores do cultivo em sequeiro, ampliando a utilização de sistemas de irrigação e conseqüentemente de seus custos de produção. Enquadra-se nesta categoria os pólos agrícolas de Campos Lindos e Mateiros.

Os maiores valores da CAD apresentados no Rio Formoso, conforme citado acima, e sua caracterização de baixo risco climático nos cenários de concentração de poluentes atmosféricos diagramados (RCP 4.5 e 8.5 do modelo MIROC5) configurou uma intensa prospecção da sojicultura sobre as fitofisionomias da APA da Ilha do Bananal/Cantão. Esta antropização ocorreu de forma diferenciada para cada perspectiva compilada. No RCP 4.5 os percentuais de remoção de cobertura vegetal para contentamento do sistema produtivo em análise de distribuição espacial foram menores do que os relativos à projeção do clima RCP 8.5. Este último restringiu os espaços com maiores chances de disponibilidade hídrica, redirecionando todos os empreendimentos para esta UC em detalhamento. Isto refletiu em um vetor de criação e expansão de manchas das lavouras desta dicotiledônea em direção ao bioma amazônico.

O acoplamento entre modelos realizado, de solo, de clima e de dinâmica territorial carece da modelagem de estimativa de produtividades. Especula-se que o aumento desta característica de maior relevância agrônômica tensionaria os cenários para expressar menores taxas de desmatamento, e conseqüentemente de menor emissão de dióxido de carbono

equivalente. Assim sendo este trabalho superestima a degradação das Unidades de Conservação sob o avanço da maior fronteira agrícola estadual.

## APÊNDICES

## Apêndice A – Resultados do programa Qualisolo adaptado para o ambiente de planilhas eletrônicas

ID	UF	Município	Lon	Lat	Pp	Ps	COS	AT	ST	AG	θres	θsat	alfa	n	m	θcc	θpmp	DTA	CAD
1	MA	Aldeias Altas	43,47	4,63	2,86	1,52	0,80	750	60	190	0,05	0,31	0,37	1,51	0,34	0,14	0,08	0,58	28,79
2	MA	Aldeias Altas	43,47	4,63	2,77	1,36	2,00	650	80	270	0,09	0,37	0,43	1,47	0,32	0,19	0,13	0,60	29,99
3	PI	Alto Longá	42,17	5,18	2,50	1,42	1,00	640	200	160	0,03	0,30	0,29	1,30	0,23	0,19	0,08	1,08	53,88
4	PI	Alto Longá	42,17	5,18	2,50	1,41	1,60	700	160	140	0,03	0,31	0,32	1,33	0,25	0,17	0,07	1,01	50,36
5	PI	Alto Longá	42,17	5,18	2,50	1,43	2,90	480	280	240	0,05	0,30	0,23	1,25	0,20	0,24	0,12	1,15	57,67
6	PI	Alto Longá	42,17	5,18	2,50	1,39	4,20	770	150	80	0,01	0,32	0,36	1,33	0,25	0,15	0,04	1,06	52,75
7	PI	Alto Longá	42,17	5,18	2,50	1,28	9,90	780	130	90	0,02	0,38	0,42	1,37	0,27	0,14	0,04	0,98	48,92
8	MA	Barra do Corda	45,23	5,50	2,63	1,45	2,10	350	200	450	0,12	0,31	0,21	1,29	0,22	0,29	0,20	0,86	42,81
9	MA	Barra do Corda	45,23	5,50	2,63	1,44	3,10	410	210	380	0,10	0,31	0,23	1,29	0,22	0,27	0,18	0,93	46,60
10	MA	Barra do Corda	45,23	5,50	2,56	1,41	5,90	410	230	360	0,10	0,32	0,22	1,28	0,22	0,27	0,17	0,98	49,22
11	MA	Barra do Corda	45,23	5,50	2,56	1,33	10,30	420	240	340	0,10	0,36	0,24	1,29	0,22	0,27	0,17	1,05	52,36
12	PI	Canto do Buriti	42,93	8,10	2,60	1,42	1,30	530	180	290	0,08	0,32	0,29	1,32	0,24	0,23	0,14	0,93	46,37
13	PI	Canto do Buriti	42,93	8,10	2,60	1,42	1,00	560	160	280	0,08	0,32	0,30	1,34	0,25	0,22	0,13	0,88	44,16
14	PI	Canto do Buriti	42,93	8,10	2,60	1,50	1,60	590	140	270	0,07	0,28	0,28	1,35	0,26	0,20	0,12	0,83	41,65
15	PI	Canto do Buriti	42,93	8,10	2,60	1,47	2,50	650	110	240	0,06	0,30	0,32	1,39	0,28	0,18	0,10	0,77	38,43
16	PI	Canto do Buriti	42,93	8,10	2,60	1,46	4,50	730	90	180	0,04	0,30	0,34	1,42	0,30	0,15	0,07	0,75	37,46
17	MA	Caxias	43,35	4,85	2,56	1,70	1,00	730	70	200	0,03	0,20	0,20	1,45	0,31	0,13	0,06	0,64	32,20
18	MA	Caxias	43,35	4,85	2,56	1,63	1,30	740	60	200	0,04	0,22	0,24	1,49	0,33	0,12	0,07	0,58	29,13
19	MA	Caxias	43,35	4,85	2,56	1,61	2,80	760	40	200	0,04	0,23	0,24	1,78	0,44	0,09	0,06	0,26	12,85
20	MA	Caxias	43,35	4,85	2,56	1,49	1,40	910	30	60	0,01	0,28	0,27	1,92	0,48	0,03	0,01	0,19	9,54
21	MA	Caxias	43,35	4,85	2,56	1,50	3,30	880	60	60	0,01	0,28	0,32	1,47	0,32	0,09	0,02	0,72	35,93
22	MA	Chapadinha	43,35	3,73	2,54	1,88	0,60	530	110	360	0,04	0,14	0,13	1,34	0,25	0,16	0,10	0,60	30,15
23	MA	Chapadinha	43,35	3,73	2,56	2,11	0,40	490	130	380	0,03	0,08	0,10	1,26	0,21	0,12	0,08	0,46	22,82
24	MA	Chapadinha	43,35	3,73	2,55	2,09	1,20	460	120	420	0,03	0,09	0,10	1,26	0,21	0,13	0,09	0,44	21,97
25	MA	Chapadinha	43,35	3,73	2,55	1,64	2,50	630	110	260	0,05	0,22	0,22	1,37	0,27	0,17	0,09	0,74	37,00
26	MA	Chapadinha	43,35	3,73	2,50	1,86	5,90	660	140	200	0,02	0,14	0,12	1,32	0,24	0,14	0,06	0,77	38,47
27	MA	Chapadinha	43,35	3,73	2,50	1,95	11,50	640	160	200	0,02	0,11	0,10	1,28	0,22	0,13	0,06	0,72	35,94
28	MA	Colinas	44,17	6,03	2,65	1,62	2,10	630	70	300	0,06	0,24	0,27	1,46	0,32	0,17	0,11	0,57	28,29
29	MA	Colinas	44,17	6,03	2,63	1,47	3,80	640	60	300	0,08	0,30	0,34	1,52	0,34	0,17	0,12	0,48	23,78
30	MA	Colinas	44,17	6,03	2,62	1,75	7,10	680	60	260	0,04	0,19	0,20	1,48	0,32	0,14	0,08	0,55	27,44
31	MA	Colinas	44,17	6,03	2,67	1,64	10,30	690	60	250	0,05	0,24	0,26	1,50	0,33	0,14	0,09	0,54	27,14
32	MA	Grajaú	46,15	5,82	2,63	1,48	1,80	780	60	160	0,04	0,30	0,34	1,50	0,33	0,12	0,06	0,60	30,00

33	MA	Grajaú	46,15	5,82	2,56	1,43	2,90	830	30	140	0,03	0,31	0,31	2,02	0,50	0,06	0,05	0,12	5,92
34	MA	Grajaú	46,15	5,82	2,64	1,41	3,90	810	40	150	0,04	0,33	0,36	1,80	0,44	0,08	0,06	0,23	11,43
35	MA	Grajaú	46,15	5,82	2,56	1,51	6,90	790	70	140	0,03	0,27	0,30	1,46	0,32	0,12	0,05	0,69	34,45
36	MA	Grajaú	46,15	5,82	2,56	1,31	10,40	800	70	130	0,04	0,37	0,43	1,48	0,32	0,12	0,05	0,66	33,09
37	MA	Grajaú	46,15	5,82	2,56	1,30	15,70	790	80	130	0,04	0,38	0,42	1,46	0,32	0,13	0,06	0,71	35,71
38	MA	Imperatriz	47,47	5,52	2,57	1,36	0,70	630	190	180	0,05	0,35	0,33	1,32	0,24	0,20	0,09	1,06	52,94
39	MA	Imperatriz	47,47	5,52	2,56	1,39	1,00	590	170	240	0,06	0,33	0,32	1,33	0,25	0,21	0,11	0,94	47,17
40	MA	Imperatriz	47,47	5,52	2,56	1,39	1,90	540	150	310	0,09	0,33	0,31	1,35	0,26	0,22	0,14	0,83	41,27
41	MA	Imperatriz	47,47	5,52	2,57	1,50	3,00	600	260	140	0,02	0,28	0,24	1,26	0,21	0,20	0,08	1,21	60,38
42	MA	Imperatriz	47,47	5,52	2,55	1,36	15,70	560	300	140	0,03	0,34	0,28	1,25	0,20	0,22	0,09	1,33	66,66
43	BA	Irecê	41,85	11,30	2,60	1,15	8,40	460	320	220	0,07	0,48	0,31	1,27	0,21	0,27	0,13	1,40	70,03
44	BA	Irecê	41,85	11,30	2,53	1,10	12,40	470	280	250	0,09	0,51	0,32	1,30	0,23	0,27	0,14	1,27	63,44
45	BA	Irecê	41,85	11,30	2,53	1,29	23,80	490	280	230	0,06	0,38	0,28	1,27	0,21	0,25	0,12	1,23	61,71
46	BA	Jeremoabo	38,33	10,07	2,68	1,53	2,70	100	560	340	0,05	0,28	0,10	1,17	0,15	0,31	0,18	1,35	67,54
47	BA	Jeremoabo	38,33	10,07	2,58	1,46	4,70	110	430	460	0,10	0,30	0,10	1,19	0,16	0,33	0,22	1,14	56,81
48	BA	Jeremoabo	38,33	10,07	2,57	1,52	7,10	170	240	590	0,14	0,27	0,10	1,23	0,19	0,32	0,25	0,78	38,99
49	BA	Jeremoabo	38,33	10,07	2,48	1,32	30,90	300	360	340	0,09	0,35	0,15	1,24	0,19	0,30	0,17	1,28	63,97
50	BA	Juazeiro	40,50	9,42	2,63	2,06	2,50	170	210	620	0,06	0,11	0,10	1,15	0,13	0,19	0,15	0,36	17,83
51	BA	Juazeiro	40,50	9,42	2,56	2,04	3,10	190	240	570	0,05	0,10	0,10	1,14	0,12	0,17	0,14	0,37	18,38
52	BA	Juazeiro	40,50	9,42	2,56	0,42	3,10	220	230	550	0,96	1,99	0,37	1,33	0,25	0,53	0,43	1,06	53,17
53	BA	Juazeiro	40,50	9,42	2,56	1,94	5,40	240	230	530	0,06	0,12	0,10	1,18	0,15	0,20	0,15	0,50	25,16
54	BA	Juazeiro	40,50	9,42	2,44	1,42	12,00	260	190	550	0,15	0,29	0,17	1,27	0,21	0,30	0,23	0,73	36,41
55	BA	Malhada	43,58	14,17	2,67	1,33	2,70	110	430	460	0,12	0,38	0,10	1,22	0,18	0,37	0,23	1,33	66,70
56	BA	Malhada	43,58	14,17	2,67	1,19	3,60	110	390	500	0,18	0,47	0,10	1,25	0,20	0,40	0,27	1,36	67,94
57	BA	Malhada	43,58	14,17	2,64	1,22	5,00	110	410	480	0,16	0,44	0,10	1,24	0,19	0,39	0,25	1,37	68,74
58	BA	Malhada	43,58	14,17	2,53	1,16	17,40	170	490	340	0,09	0,47	0,11	1,24	0,19	0,35	0,18	1,68	84,20
59	MA	Mirador	44,92	6,47	2,56	1,59	0,80	670	90	240	0,05	0,24	0,25	1,41	0,29	0,16	0,09	0,70	34,78
60	MA	Mirador	44,92	6,47	2,56	1,57	3,50	710	90	200	0,04	0,25	0,26	1,41	0,29	0,15	0,07	0,73	36,61
61	MA	Mirador	44,92	6,47	2,60	1,45	7,90	890	50	60	0,01	0,31	0,35	1,54	0,35	0,08	0,02	0,59	29,61
62	PI	Monsenhor Gil	42,60	5,55	2,57	1,48	0,80	170	370	460	0,10	0,29	0,10	1,21	0,17	0,32	0,21	1,09	54,57
63	PI	Monsenhor Gil	42,60	5,55	2,58	1,45	1,30	180	350	470	0,11	0,30	0,10	1,22	0,18	0,32	0,22	1,10	54,84
64	PI	Monsenhor Gil	42,60	5,55	2,58	1,46	2,20	360	220	420	0,11	0,30	0,19	1,28	0,22	0,28	0,19	0,91	45,57
65	PI	Monsenhor Gil	42,60	5,55	2,60	1,50	3,80	480	200	320	0,08	0,28	0,24	1,29	0,22	0,24	0,14	0,94	46,78
66	PI	Monsenhor Gil	42,60	5,55	2,61	1,51	7,60	580	220	200	0,04	0,28	0,26	1,28	0,22	0,21	0,10	1,08	54,17
67	PI	Monsenhor Gil	42,60	5,55	2,61	1,53	11,70	670	200	130	0,02	0,27	0,27	1,29	0,22	0,18	0,07	1,11	55,40
68	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,56	1,58	2,80	470	60	470	0,11	0,24	0,29	1,46	0,32	0,21	0,17	0,41	20,57
69	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,60	1,48	3,90	480	70	450	0,12	0,29	0,34	1,45	0,31	0,23	0,18	0,46	23,05

70	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,56	1,48	3,90	730	40	230	0,06	0,29	0,31	1,80	0,44	0,10	0,08	0,21	10,67
71	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,63	1,49	8,40	710	70	220	0,05	0,29	0,33	1,47	0,32	0,15	0,09	0,61	30,71
72	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,56	1,66	5,60	820	60	120	0,02	0,21	0,22	1,48	0,32	0,10	0,04	0,66	32,90
73	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,60	1,45	3,50	920	40	40	0,00	0,31	0,32	1,73	0,42	0,04	0,00	0,34	16,90
74	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,60	1,42	5,50	870	50	80	0,01	0,32	0,36	1,55	0,35	0,08	0,03	0,56	28,00
75	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,60	1,62	3,10	500	70	430	0,09	0,23	0,27	1,43	0,30	0,20	0,16	0,49	24,32
76	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,60	1,46	6,00	790	70	140	0,03	0,30	0,35	1,46	0,32	0,12	0,05	0,69	34,49
77	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,56	1,51	9,90	760	80	160	0,03	0,27	0,30	1,43	0,30	0,13	0,06	0,73	36,40
78	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,56	1,49	6,40	820	100	80	0,01	0,28	0,32	1,38	0,28	0,13	0,03	0,91	45,25
79	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,60	1,58	6,40	910	40	50	0,00	0,25	0,25	1,73	0,42	0,04	0,01	0,36	17,81
80	BA	Nova Viçosa	39,85	17,87	2,60	1,56	6,40	900	50	50	0,00	0,26	0,28	1,53	0,35	0,07	0,01	0,62	31,22
81	MA	Paço do Lumiar	44,15	2,50	2,50	1,57	0,80	630	120	250	0,05	0,24	0,24	1,36	0,26	0,17	0,09	0,78	38,77
82	MA	Paço do Lumiar	44,15	2,50	2,50	1,41	1,50	630	120	250	0,07	0,31	0,32	1,38	0,28	0,18	0,11	0,78	39,03
83	MA	Paço do Lumiar	44,15	2,50	2,50	1,56	3,60	630	130	240	0,05	0,24	0,24	1,35	0,26	0,17	0,09	0,81	40,56
84	MA	Paço do Lumiar	44,15	2,50	2,50	1,61	5,80	660	160	180	0,03	0,22	0,22	1,31	0,24	0,17	0,07	0,92	46,10
85	MA	Paço do Lumiar	44,15	2,50	2,50	1,44	6,70	720	140	140	0,03	0,29	0,31	1,35	0,26	0,16	0,06	0,95	47,45
86	MA	Paço do Lumiar	44,15	2,50	2,50	1,36	15,90	740	140	120	0,03	0,34	0,37	1,35	0,26	0,16	0,06	0,98	49,00
87	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,63	1,23	3,70	408	61	531	0,22	0,43	0,51	1,49	0,33	0,30	0,27	0,36	17,82
88	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,53	1,10	7,10	326	62	612	0,30	0,51	0,57	1,45	0,31	0,37	0,33	0,35	17,31
89	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,53	1,15	8,10	378	72	550	0,24	0,47	0,51	1,45	0,31	0,33	0,29	0,40	20,19
90	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,63	1,19	3,70	496	58	446	0,19	0,46	0,52	1,56	0,36	0,26	0,23	0,33	16,60
91	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,70	1,20	3,00	546	50	404	0,17	0,46	0,54	1,63	0,39	0,23	0,21	0,27	13,55
92	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,67	1,21	3,80	550	45	405	0,17	0,45	0,54	1,70	0,41	0,22	0,20	0,21	10,26
93	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,63	1,20	5,20	604	73	323	0,13	0,45	0,49	1,52	0,34	0,21	0,16	0,47	23,74
94	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,63	1,33	6,10	785	54	161	0,05	0,37	0,43	1,56	0,36	0,12	0,07	0,49	24,66
95	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,67	1,42	6,50	886	34	80	0,02	0,33	0,34	1,89	0,47	0,04	0,02	0,19	9,43
96	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,63	1,33	12,80	820	39	141	0,04	0,37	0,40	1,86	0,46	0,07	0,05	0,18	9,12
97	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,67	1,31	4,50	736	61	203	0,07	0,39	0,44	1,54	0,35	0,14	0,09	0,51	25,43
98	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,63	1,22	4,20	748	50	202	0,07	0,44	0,49	1,64	0,39	0,13	0,09	0,35	17,74
99	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,61	1,36	1,20	470	110	420	0,13	0,35	0,36	1,39	0,28	0,26	0,19	0,63	31,30
100	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,65	1,35	1,90	490	120	390	0,13	0,36	0,36	1,39	0,28	0,25	0,18	0,68	33,81
101	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,59	1,42	6,80	510	160	330	0,09	0,32	0,30	1,33	0,25	0,23	0,15	0,84	42,09
102	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,71	1,47	9,80	700	110	190	0,05	0,31	0,35	1,39	0,28	0,17	0,08	0,83	41,41
103	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,64	1,30	10,10	740	110	150	0,04	0,39	0,43	1,41	0,29	0,15	0,07	0,84	41,91
104	BA	Porto Seguro	39,05	16,43	2,64	1,28	10,10	830	80	90	0,02	0,40	0,47	1,45	0,31	0,11	0,04	0,77	38,40
105	BA	Rio de Contas	41,80	13,58	2,60	1,51	2,80	380	60	560	0,15	0,28	0,36	1,43	0,30	0,26	0,23	0,38	18,80
106	BA	Rio de Contas	41,80	13,58	2,56	1,43	3,80	430	70	500	0,14	0,31	0,36	1,44	0,31	0,25	0,21	0,43	21,67

107	BA	Rio de Contas	41,80	13,58	2,56	1,46	4,80	490	70	440	0,12	0,29	0,34	1,45	0,31	0,23	0,18	0,46	23,25
108	BA	Rio de Contas	41,80	13,58	2,60	1,45	6,00	520	80	400	0,11	0,31	0,34	1,44	0,31	0,22	0,17	0,53	26,41
109	BA	Rio de Contas	41,80	13,58	2,53	1,51	10,80	730	90	180	0,04	0,27	0,29	1,41	0,29	0,14	0,07	0,75	37,48
110	BA	Santa Teresinha	39,60	12,77	2,61	1,38	1,60	510	130	360	0,11	0,34	0,34	1,37	0,27	0,24	0,17	0,73	36,63
111	BA	Santa Teresinha	39,60	12,77	2,61	1,43	1,50	640	110	250	0,07	0,32	0,33	1,40	0,29	0,18	0,11	0,75	37,69
112	BA	Santa Teresinha	39,60	12,77	2,61	1,50	1,60	650	110	240	0,06	0,28	0,30	1,39	0,28	0,18	0,10	0,77	38,44
113	BA	Santa Teresinha	39,60	12,77	2,61	1,46	2,40	690	90	220	0,06	0,30	0,33	1,43	0,30	0,16	0,09	0,70	35,23
114	BA	Santa Teresinha	39,60	12,77	2,61	1,32	3,60	760	70	170	0,05	0,37	0,43	1,49	0,33	0,14	0,07	0,62	30,94
115	BA	Santa Teresinha	39,60	12,77	2,61	1,46	5,80	770	80	150	0,03	0,30	0,34	1,44	0,31	0,13	0,06	0,73	36,58
116	BA	São Desidério	45,93	12,75	2,64	1,67	1,50	850	20	130	0,02	0,22	0,20	2,19	0,54	0,05	0,04	0,09	4,64
117	BA	São Desidério	45,93	12,75	2,64	1,67	2,90	840	30	130	0,02	0,22	0,21	1,99	0,50	0,05	0,04	0,16	8,19
118	BA	São Desidério	45,93	12,75	2,60	1,64	25,70	820	70	110	0,02	0,23	0,25	1,44	0,31	0,11	0,04	0,74	36,95
119	BA	São Desidério	45,93	12,75	2,48	0,46	99,80	340	290	370	0,52	1,77	0,39	1,36	0,26	0,39	0,26	1,29	64,48
120	PI	São Raimundo	42,68	9,00	2,63	1,39	1,90	610	130	260	0,08	0,34	0,34	1,38	0,28	0,20	0,12	0,81	40,58
121	PI	São Raimundo	42,68	9,00	2,63	1,45	2,30	650	110	240	0,06	0,31	0,34	1,39	0,28	0,18	0,10	0,77	38,63
122	PI	São Raimundo	42,68	9,00	2,59	1,53	1,80	720	100	180	0,04	0,27	0,29	1,40	0,29	0,15	0,07	0,79	39,47
123	PI	São Raimundo	42,68	9,00	2,63	1,58	3,70	750	80	170	0,03	0,25	0,28	1,43	0,30	0,14	0,06	0,73	36,29
124	PI	São Raimundo	42,68	9,00	2,56	1,52	7,10	750	80	170	0,04	0,27	0,30	1,43	0,30	0,14	0,06	0,72	35,95
125	PI	São Raimundo	42,68	9,00	2,59	1,57	1,20	650	110	240	0,05	0,25	0,26	1,38	0,28	0,17	0,09	0,77	38,40
126	PI	São Raimundo	42,68	9,00	2,63	1,50	0,70	690	110	200	0,05	0,29	0,31	1,39	0,28	0,16	0,08	0,81	40,42
127	PI	São Raimundo	42,68	9,00	2,59	1,52	1,50	780	70	150	0,03	0,27	0,30	1,46	0,32	0,12	0,06	0,68	34,15
128	PI	São Raimundo	42,68	9,00	2,59	1,43	4,90	820	60	120	0,03	0,31	0,36	1,50	0,33	0,11	0,04	0,63	31,35
129	PI	Teresina	42,80	5,08	2,56	1,49	1,80	560	340	100	0,01	0,28	0,21	1,23	0,19	0,21	0,07	1,38	68,88
130	PI	Teresina	42,80	5,08	2,53	1,60	6,80	600	300	100	0,01	0,23	0,19	1,23	0,19	0,19	0,07	1,22	60,99
131	PI	Teresina	42,80	5,08	2,53	2,00	0,50	780	120	100	0,01	0,10	0,10	1,32	0,24	0,11	0,03	0,73	36,73
132	PI	Teresina	42,80	5,08	2,50	1,47	1,60	640	280	80	0,01	0,28	0,25	1,25	0,20	0,19	0,06	1,29	64,36
133	PI	Teresina	42,80	5,08	2,56	1,45	4,30	240	500	260	0,04	0,30	0,10	1,20	0,17	0,29	0,14	1,49	74,74
134	PI	Teresina	42,80	5,08	2,35	1,17	19,50	120	510	370	0,09	0,43	0,10	1,22	0,18	0,34	0,19	1,55	77,68
135	PI	Teresina	42,80	5,08	2,50	1,62	2,30	560	290	150	0,02	0,22	0,16	1,24	0,19	0,19	0,08	1,15	57,47
136	PI	Teresina	42,80	5,08	2,50	1,45	0,90	820	140	40	0,00	0,29	0,33	1,33	0,25	0,13	0,03	1,07	53,41
137	PI	Teresina	42,80	5,08	2,59	1,51	2,10	740	190	70	0,01	0,28	0,30	1,29	0,22	0,16	0,05	1,15	57,64
138	PI	Teresina	42,80	5,08	2,59	1,44	2,40	630	290	80	0,01	0,31	0,27	1,25	0,20	0,20	0,06	1,36	67,85
139	PI	Teresina	42,80	5,08	2,50	1,45	3,50	680	240	80	0,01	0,29	0,28	1,27	0,21	0,18	0,06	1,23	61,50
140	PI	Teresina	42,80	5,08	2,46	1,30	6,50	690	230	80	0,01	0,36	0,37	1,28	0,22	0,18	0,06	1,25	62,55
141	PI	Teresina	42,80	5,08	2,95	1,20	9,10	690	230	80	0,02	0,49	0,50	1,31	0,24	0,19	0,05	1,35	67,48
142	MA	Turiaçu	45,37	1,67	2,56	1,51	1,70	710	100	190	0,04	0,27	0,29	1,40	0,29	0,15	0,08	0,78	38,83
143	MA	Turiaçu	45,37	1,67	2,56	1,48	3,70	720	120	160	0,04	0,29	0,31	1,37	0,27	0,16	0,07	0,88	43,85

144	MA	Turiaçu	45,37	1,67	2,56	1,49	4,70	720	120	160	0,03	0,28	0,30	1,37	0,27	0,16	0,07	0,88	43,81
145	MA	Turiaçu	45,37	1,67	2,56	1,43	10,20	730	150	120	0,03	0,31	0,33	1,34	0,25	0,16	0,06	1,01	50,55
146	BA	Uruçuca	39,28	14,58	3,00	0,95	0,62	310	90	600	0,41	0,72	0,61	1,41	0,29	0,44	0,39	0,48	24,07
147	BA	Uruçuca	39,28	14,58	3,00	0,99	0,81	330	110	560	0,35	0,68	0,53	1,40	0,29	0,42	0,36	0,57	28,25
148	BA	Uruçuca	39,28	14,58	2,97	0,96	1,12	340	100	560	0,37	0,70	0,57	1,42	0,30	0,41	0,36	0,52	25,94
149	BA	Uruçuca	39,28	14,58	2,84	1,04	1,37	390	110	500	0,28	0,61	0,50	1,43	0,30	0,36	0,30	0,56	28,04
150	BA	Uruçuca	39,28	14,58	2,82	1,02	1,53	460	120	420	0,24	0,63	0,52	1,44	0,31	0,31	0,25	0,62	30,93
151	BA	Uruçuca	39,28	14,58	2,76	1,01	1,98	580	150	270	0,14	0,63	0,52	1,42	0,30	0,24	0,16	0,81	40,60
152	BA	Uruçuca	39,28	14,58	3,07	1,45	0,35	390	200	410	0,13	0,36	0,28	1,31	0,24	0,31	0,21	0,95	47,56
153	BA	Uruçuca	39,28	14,58	2,97	1,24	0,70	290	160	550	0,24	0,47	0,31	1,33	0,25	0,39	0,31	0,75	37,61
154	BA	Uruçuca	39,28	14,58	2,93	1,33	0,91	290	170	540	0,20	0,41	0,28	1,31	0,24	0,37	0,29	0,78	38,90
155	BA	Uruçuca	39,28	14,58	2,88	1,24	1,22	390	180	430	0,18	0,46	0,34	1,34	0,25	0,32	0,24	0,87	43,31
156	BA	Uruçuca	39,28	14,58	2,80	1,24	1,51	460	200	340	0,13	0,45	0,35	1,33	0,25	0,28	0,19	0,98	49,15
157	BA	Uruçuca	39,28	14,58	2,73	1,14	1,67	550	200	250	0,10	0,51	0,42	1,35	0,26	0,24	0,14	1,04	52,00