



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E GEODINÂMICA

MAYARA LUCYANNE SANTOS DE ARAÚJO

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA CULTURA DE SOJA NA REGIÃO DO  
MATOPIBA, BRASIL (1990-2015)**

**Dissertação nº 129**

Brasília - DF  
Março de 2018

MAYARA LUCYANNE SANTOS DE ARAÚJO

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA CULTURA DE SOJA NA REGIÃO DO  
MATOPIBA, BRASIL (1990-2015)**

**Dissertação nº 129**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Geoprocessamento e Análise Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Edson Eyji Sano

Brasília - DF

Março de 2018

MAYARA LUCYANNE SANTOS DE ARAÚJO

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA CULTURA DE SOJA NA REGIÃO DO  
MATOPIBA, BRASIL (1990-2015)**

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Dr. Edson Eyji Sano  
Embrapa Cerrados - Orientador

---

Dr. Tati de Almeida  
Universidade de Brasília – Examinador Interno

---

Dr. Edson Luís Bolfe  
Embrapa Sede – Examinador Externo

## FICHA CATALOGRÁFICA

ARAÚJO, Mayara Lucyanne Santos de

Dinâmica espaço-temporal da cultura de soja na região do Matopiba, Brasil (1990-2015) / Mayara Lucyanne Santos de Araújo; orientador Edson Eyji Sano. Brasília, 2018.

84p.

Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica), nº 129 – Universidade de Brasília/Instituto de Geociências, 2018.

1. Expansão agrícola; 2. Soja; 3. Geoprocessamento; 4. Estatística Espacial.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, M. L. S. Dinâmica espaço-temporal da cultura de soja na região do Matopiba, Brasil (1990-2015). Brasília, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2018, 84p. Dissertação de Mestrado.

“Não temas, porque eu sou contigo;  
Não te assombres, porque eu sou teu Deus;  
Eu te fortaleço, e te ajudo, e te sustento com a destra da minha justiça”.

– Isaías 41:10.

Ao meu Deus,  
Com todo amor e carinho,  
Por ser meu refúgio e fortaleza diariamente,  
Dedico.

## AGRADECIMENTOS

A caminhada não foi fácil até aqui, mas ninguém disse que seria. Como eu costumo falar: Não há vitórias sem lutas. E eu venci. Mas eu não venci sozinha. Que Ele cresça e eu diminua sempre. Porque a vitória não é só minha, é Dele. Do meu Deus e Senhor Jesus. Do seu amor infinito. Daquele que nos momentos que eu me senti fraca e sozinha, sempre segurou a minha mão. No qual, suas Palavras sempre foram luz para os meus caminhos. Muito obrigada, Deus. Obrigada pelo amor, paz e força diariamente. Obrigada pelas inúmeras bênçãos em minha vida. Obrigada por existir.

Agradeço de uma forma mais que especial aos meus pais, Luzia Santos e Francisco Araújo (Franzeh). Pelo amor incondicional. Por sempre estarem ao meu lado, sendo meu porto seguro. Por seus ensinamentos. Me guiando sempre pelo caminho do amor, do carinho, da verdade e da justiça. Obrigada por tudo, mãe. Compreendo o tamanho da felicidade em seu coração com esse momento. Todos os dias você fez tudo que estava a seu alcance para colocar um sorriso em meu rosto, e tenha a certeza que sempre farei o mesmo por você. Obrigada meu pai. Obrigada por sempre guiar nossa família, dentre tantas dificuldades encontradas na Vida, por um caminho correto, me educando e ensinando sempre a ser uma pessoa melhor. Sei o enorme orgulho que sentes com as minhas vitórias. Gratidão aos dois.

Agradeço as minhas princesas, Natália e Letícia. Irmão significa amor sem medidas, cumplicidade, risos e afetos. Obrigada por tudo isso e muito mais. Obrigada por sempre estarem ao meu lado, independente dos erros ou acertos. Vocês sempre serão as minhas pequenas, na qual vou guiar e proteger. Obrigada pela força na busca pelos meus objetivos, palavras de apoio e felicidade em cada vitória.

Ao meu noivo, Joseph Soares, obrigada por todo amor, carinho, paciência e principalmente, companheirismo. Essa caminhada foi difícil para nós dois, mas com certeza, foi o fortalecimento de uma base para toda a vida. Obrigada por sempre estar ao meu lado, me escutando, apoiando, incentivando e ajudando. Você é uma pessoa incrível, muito obrigada.

Agradeço de forma mais especial ao professor Edson Sano. Muito obrigada pela confiança depositada em mim. Com certeza, seu sim para a minha orientação foi essencial para esse momento. Um sim que para alguns é simples, mas significou a confiança depositada em uma aluna do Maranhão, sem nenhum contato prévio, e a oportunidade de realizar mestrado em uma grande instituição, de realizar um sonho. Eu serei eternamente

grata. Que outros professores possam se espelhar no senhor, acreditando no potencial de alunos que só precisam de uma oportunidade para crescer e vencer, de um sim. Obrigada pela orientação, ajuda, humildade, simplicidade e principalmente, amizade.

Agradeço também de forma mais que especial, ao professor Fabrício Silva. Deus, em sua infinita bondade, coloca as pessoas certas em nossos caminhos, para nos guiar e ajudar a alcançar nossos objetivos. O senhor foi uma dessas pessoas. Muito mais que um orientador, um grande amigo. Obrigada por toda a ajuda desde a graduação, todas as orientações em trabalhos, confiança em projetos e pelos ótimos conselhos. Com certeza, o senhor me ensinou bem mais que os conhecimentos dentro de uma universidade. O senhor me ensinou a ser uma pessoa melhor. Também sou eternamente grata. Obrigada por tudo, professor.

Os meus sinceros agradecimentos a todos que fizeram parte da minha história na capital do Brasil. A Ilanna Rêgo, que desde o começo me incentivou a encarar esse desafio, antes mesmo de me conhecer pessoalmente. Sua ajuda foi essencial no começo dessa jornada. Ao meu amigo Fernando Hiago, obrigada por todo conhecimento e ajuda no conteúdo realizado, por todos os conselhos e brincadeiras. Agradeço aos grandes amigos do IG-UnB e do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Análise Espacial: Caroline Chahini, Khalil Ganem, Diogo Olivetti, Marcell Terra, Luísa Resende, Tamiris de Assis, Thaíse Rodrigues, Amanda, Francielle Lima, Emmanuel Moreira, Bruno Borges, Kássia, Derlayne, Deorgia, Henrique Bernini. Grande parte do conhecimento é construído ali, no laboratório.

Agradeço aos professores do IG-UnB pelo conhecimento compartilhado e pela disposição em ajudar no que fosse necessário. Obrigada em especial as professoras Rejane Cicerelli, Tati Almeida e Luciana Prado. Assim como, ao professor Gustavo Baptista e Elder Yokoyama. Agradeço também a todos os funcionários do IG-UnB, que contribuem com alegria em suas atividades. Em especial, a Dona Socorro e Serjão.

Obrigada a Colina UnB pelo suporte na estadia em Brasília. Como, a todos os amigos que fiz nesse prédio, como Yuri Alves, Ludovico, Joao e Núbia. Em especial, as minhas queridas Francielle Lima e Lorena Lopes. Obrigada pelo companheirismo, conversas, desabafos e passeios. Levo a amizade de todos vocês por toda a vida.

Agradeço também ao Laboratório de Geotecnologias da Universidade Ceuma, em São Luís/MA, por todo o apoio durante a realização da dissertação. Assim como, aos integrantes dessa grande família. Em especial, aos meus grandes amigos Jessflan Rafael, Emenson Carpegiane, Juliana Salles e Juliana Lopes.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo suporte financeiro à pesquisa desenvolvida.

Enfim, agradeço a todos os amigos e colegas que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização desse Mestrado. As palavras de motivação e orações também foram essenciais.

Sonhar, viver e sempre agradecer. Muito obrigada.

## RESUMO

O Brasil possui uma predisposição para cultivos agrícolas. O país é um dos líderes mundiais na produção e exportação de grãos, principalmente os grãos de soja. A região do Matopiba, acrônimo das iniciais dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, apresenta elevado crescimento na produção de soja e um grande potencial agrícola para a cultura. Análise da dinâmica espaço-temporal dos plantios de culturas agrícolas é essencial na elaboração de planejamentos agrícolas, por exemplo, para aumentar a produção e produtividade agrícola dos mesmos. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal da produção e produtividade da soja na região do Matopiba, no período de 1990 a 2015, com o uso das técnicas de estatística espacial de áreas para séries temporais. Para tal, foram utilizados os dados municipais de área plantada, área colhida e produção da soja, obtidos da plataforma Sistema IBGE de Recuperação Automática. A produtividade foi estimada a partir dos dados de produção e área plantada. As análises dos agrupamentos espaciais foram obtidas por meio dos índices global e local de Moran. As zonas de elevada produção da cultura de soja estão localizadas nas mesorregiões do Extremo Oeste baiano, Sul maranhense e Sudoeste piauiense. As zonas com maior produtividade de soja estão em decréscimo na região do Matopiba, localizadas no Extremo Oeste baiano, Sul tocantinense e Sudeste maranhense. As zonas de baixa produtividade de soja são encontradas no Centro-Leste maranhense, Oeste maranhense e norte do Tocantins, além do município baiano de Wanderley. A produção e a produtividade de soja no Matopiba seguem padrões espaciais que refletem a aptidão local e regional à cultura, demonstrando que a migração da cultura de soja ocorre principalmente devido às políticas públicas e aos investimentos tecnológicos na região. Os resultados das análises produzidas neste estudo servem de subsídio para os planejamentos agrícolas local e regional no Matopiba, além de embasar outras análises nas áreas agrícola, ambiental, logística e hídrica da região.

**Palavras-chaves:** Expansão agrícola, Soja, Geoprocessamento, Estatística Espacial.

## ABSTRACT

Brazil has a predisposition for agricultural crops. The country is one of the world's leaders in the production and export of grains, mainly soybeans. The Matopiba region, an acronym for the initials of the states of Maranhão, Tocantins, Piauí and Bahia, shows high growth in the soybean production and great agricultural potential for this crop. Analysis of the spatio-temporal dynamics of crop plantations is essential in the elaboration of agricultural planning, for example, to increase agricultural production and productivity. In this context, the objective of this study was to analyze the spatio-temporal dynamics of soybean production and productivity in the Matopiba region, from 1990 to 2015, using the spatial statistics techniques of areas applied for time series. Municipality data of planted area, harvested area and soybean production, obtained from the IBGE Automatic Recovery System platform were used. Productivity was estimated from the production data and planted area. Spatial cluster analyzes were obtained using the global and local Moran indices. The high production zones of the soybean crop are located in the Extremo Oeste da Bahia, Sul do Maranhão and Sudoeste do Piauí mesoregions. The zones with the highest soybean yield are decreasing in the Matopiba region, located in the Extremo Oeste da Bahia, South of Tocantins and Southeast of Maranhão. The zones of low soybean yield are found in the Center-East of Maranhão, West of Maranhão and North of Tocantins, besides the municipality of Wanderley, Bahia State. Soybean production and productivity in Matopiba follow spatial patterns that reflect local and regional crop aptitude, demonstrating that the migration of soybeans mainly occurs due to public policies and technological investments in the region. The results produced in this study can subsidy local and regional agricultural planning in Matopiba and support other analyzes in the agricultural, environmental, logistic and hydrological areas of the region.

**Keyword:** Agricultural expansion, Soybean, Geoprocessing, Spatial Statistics.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....	<b>1</b>
1.1 Apresentação .....	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Hipótese .....	4
1.4 Objetivos.....	4
1.5 Estrutura da dissertação .....	4
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>6</b>
<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>14</b>
<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
3.1 Cultura da soja .....	14
3.2 Exigências agrometeorológicas da cultura de soja .....	16
3.4 Sistema de informações geográficas (SIG) .....	21
3.5 Índice de Moran.....	22
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>26</b>
<b>DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA SOJA NA REGIÃO DO MATOPIBA, BRASIL (1990-2015)</b> .....	<b>26</b>
4.1 Introdução.....	27
4.2 Material e métodos .....	30
4.2.1 Área de estudo .....	30
4.2.2 Aquisição, espacialização e análise dos dados .....	31
4.2.3 Estatística espacial para séries temporais .....	32
4.3 Resultados.....	33
4.3.1 Dinâmica espaço-temporal da produção e produtividade da soja .....	33
4.3.2 Estatística espacial.....	37
4.3.4 Estatística espacial aplicada à produção e produtividade da soja.....	38

4.4 Discussão.....	44
4.5 Conclusões.....	47
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>49</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>49</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Mapa de localização da região do Matopiba, constituído parcialmente pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. ....	7
<b>Figura 2.2</b> Mapa da área cultivada com a 1ª safra de soja na região do Matopiba (safra 2013/14).....	8
<b>Figura 2.3</b> Distribuição do Matopiba nos três biomas que integram essa região. ....	9
<b>Figura 2.4</b> Mapa de solos da região do Matopiba. ....	10
<b>Figura 2.5</b> Mapa altimétrico da região do Matopiba. ....	11
<b>Figura 2.6</b> Mapa de declividade da região do Matopiba. ....	11
<b>Figura 2.7</b> Mapa climático da região do Matopiba.....	12
<b>Figura 2.8</b> Mapa hidrogeográfico da região do Matopiba.....	13
<b>Figura 4.1</b> Mapa de delimitação territorial das mesorregiões pertencentes ao Matopiba, uma subdivisão política dos estados brasileiros que agrega um número variável de municípios envolventes com alta similaridade em termos de aspectos econômicos, sociais, e principalmente agrícolas. ....	30
<b>Figura 4.2</b> Dinâmica espaço-temporal da produção de soja no Matopiba, baseado em dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE para os anos de 1990 (A), 1995 (B), 2000 (C), 2005 (D), 2010 (E) e 2015 (F). ....	34
<b>Figura 4.3</b> Evolução da produção agrícola municipal da cultura de soja no município de São Desidério-BA (1990 a 2015). ....	35
<b>Figura 4.4</b> Dinâmica espaço-temporal da produtividade da cultura de soja, baseado em dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE para os anos de 1990 (A), 1995 (B), 2000 (C), 2005 (D), 2010 (E) e 2015 (F). ....	36
<b>Figura 4.5</b> Dinâmica espaço-temporal do índice local de Moran aplicado à produção da cultura de soja na área de estudo para os anos de 1990 (A), 1995 (B), 2000 (C), 2005 (D), 2010 (E) e 2015 (F). ....	39
<b>Figura 4.6</b> Dinâmica espaço-temporal do índice local de Moran aplicado à produtividade da cultura de soja na área de estudo para os anos de 1990 (A), 1995 (B), 2000 (C), 2005 (D), 2010 (E) e 2015 (F). ....	42
<b>Figura 4.7</b> Números de municípios com agrupamentos espaciais de produção (A) e produtividade (B) da soja no Matopiba do tipo HH, HL, LL e LH (1990 a 2015). ....	43

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> Descrição dos estádios vegetativos da soja.....	15
<b>Tabela 3.2</b> Descrição dos estádios reprodutivos da soja.....	15
<b>Tabela 4.1</b> Índice global de Moran para as variáveis de quantidade produzida, produtividade, área plantada e área colhida, considerando-se os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 e 2015.....	37

## SIGLAS

MATOIIBA	Acrônimo das iniciais do Maranhão, Tocantins, Bahia e Piauí
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
IFAD	International Fund for Agricultural Development
UNICEF	United Nations Children's Fund
WFP	World Food Programme
WHO	World Health Organization
GITE	Grupo de Inteligência Territorial Estratégica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ANA	Agência Nacional de Águas
IAC	Instituto Agrônomo de Campinas
LISA	Indicador Local de Associação Espacial
<i>I</i>	Índice global de Moran
<i>Ii</i>	Índice local de Moran
FMI	Fundo Monetário Internacional
OCDE	Organisation for Economic Co-operation and Development
IFPRI	International Food Policy Research Institute
PIB	Produto interno bruto
<i>Aw</i>	Clima tropical seco
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
ZARC	Zoneamento Agrícola de Risco Climático
PSR	Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro Rural
AGRINVEST	Programa de Investimento para Modernização da Agricultura Baiana

## **1.1 Apresentação**

O Brasil possui uma predisposição para cultivos agrícolas. Sua grande extensão territorial, climas adequados, vários tipos de solos e disponibilidade de água tornaram o país um dos principais produtores de várias *commodities* agrícolas em longos períodos de tempo. Nos últimos anos, o Brasil obteve elevado crescimento no comércio internacional de agronegócios. O país é um dos líderes mundiais na produção e exportação de inúmeros produtos agrícolas, incluindo soja, milho e algodão (Mueller & Mueller, 2016).

A produção e exportação da cultura de soja é de grande importância para o agronegócio brasileiro. A soja cresceu comercialmente no Brasil na década de 1940 como uma opção de rotação com o trigo (Brown et al., 2005). A soja adaptou-se facilmente na região Sul do Brasil devido ao clima temperado e favorável para a cultura. Gradualmente, por meio de investimentos do governo brasileiro em instituições de pesquisa do país e programas de políticas públicas (Guimarães & Leme, 1997), a soja foi modificada e melhorada para adaptar-se em outras regiões do Brasil (Andersen et al., 2002; Brown et al., 2005). Os solos de baixa fertilidade natural, como as áreas de Cerrado brasileiro, foram corrigidos, tornando-os com elevado potencial agrícola (Delgado, 1985). O aumento crescente dos rendimentos agrícolas e a expansão das terras cultivadas nos biomas do Cerrado e da Amazônia favoreceram a ascensão do Brasil na projeção mundial da produção de soja (Morton et al., 2016).

Atualmente, o Brasil é um dos líderes mundiais na produção de soja e é o segundo maior produtor mundial de óleo de soja, com uma parcela de 11% da produção global (MAPA, 2015). Em 2016/2017, o Brasil produziu 114 milhões de toneladas de soja em uma área plantada de 59,2 milhões de hectares (CONAB, 2017; USDA, 2017). Em 2015, o Brasil exportou aproximadamente 57 milhões de toneladas de soja (An & Ouyang, 2016), sendo a China a maior importadora da soja brasileira (Lima et al., 2017). A soja representa 71,84% da matéria-prima para a produção de biodiesel no Brasil (ANP, 2016) e a crescente produção brasileira de biodiesel depende fortemente do óleo de soja (Cremonez et al., 2015).

Decorrente da rápida expansão do agronegócio brasileiro, novas fronteiras agrícolas foram criadas no Norte e Nordeste do país. A região do Matopiba, definida como a integração dos municípios produtores nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (Miranda et al., 2014), apresenta elevado crescimento na produção de grãos e um grande potencial agrícola para culturas. No Matopiba, a cultura de soja tem ocupado grandes áreas e transformado a paisagem da região.

Devido ao elevado crescimento agrícola no Matopiba, o governo brasileiro instituiu o Decreto Federal nº 8.447, de 6 de maio de 2015, que estabeleceu a criação do Plano de Desenvolvimento Agropecuário para o Matopiba. O decreto tem por finalidade promover e coordenar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento econômico e sustentável nas atividades agrícolas e pecuárias na área de abrangência do Matopiba. Esse plano propõe diretrizes para programas, projetos e ações federais a serem executados na sua área de abrangência com o intuito de melhorar a qualidade de vida da população e o crescimento econômico do país. É uma forma governamental de auxiliar e monitorar o crescimento agrícola no Matopiba, principalmente com base nos aspectos socioeconômicos e ambientais.

Para a formulação de eficientes Planos de Desenvolvimento Agropecuário para o Matopiba e êxito em suas execuções, é de grande relevância a compreensão da dinâmica espaço-temporal das culturas agrícolas presentes nessa região, com ênfase nos agrupamentos espaciais que eventualmente foram se constituindo no decorrer do tempo. Para isso, as geotecnologias possibilitam identificar análises espaço-temporais de forma eficaz, servindo de subsídio para os planejamentos agrícolas, além de possibilitar a observação da interferência direta da expansão agrícola nas questões ambientais, econômicas e sociais. A estatística espacial de áreas, parte integrante dos sistemas de informações geográficas (SIGs), têm sido amplamente utilizadas por permitirem uma visão dos agrupamentos espaciais da realidade pesquisada.

## **1.2 Justificativa**

Em 2016, o número de pessoas cronicamente subnutridas no mundo aumentou para 815 milhões, contra 777 milhões em 2015 (FAO et al., 2017). Essa situação é mais notória em áreas de conflito, combinadas com secas ou inundações. Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), devido ao crescimento populacional contínuo, à ocorrência de eventos climáticos extremos e ao

aumento da renda per capita e da urbanização, haverá forte demanda de alimentos proteicos entre os anos de 2015 a 2024 (FAO, 2015). Nesse cenário, a soja destaca-se por ser a maior fonte de proteína global e uma das principais *commodities* eficazes para preencher tal necessidade. Conforme a FAO, a grande demanda mundial por alimentos com elevadas quantidades de proteínas propiciará a expansão da produção de soja no mundo, principalmente no Brasil (FAO, 2015).

A quantidade de terras disponíveis para a agricultura está em decréscimo em todo o mundo, tornando-se um recurso escasso (Lambin & Meyfroidt, 2011; Lambin et al., 2013). Atualmente, é visível a concentração da expansão da fronteira agrícola nas regiões tropicais (Hansen et al., 2009; Gibbs et al., 2010). Em 2010, 39% da vegetação natural do Cerrado brasileiro passou por alterações, principalmente na porção sul da região (Sano et al., 2010). Atualmente, cerca de 60% de grãos do Brasil é produzido no Cerrado (Andrade et al., 2017). Nas últimas décadas, a região Amazônica apresentou uma das maiores taxas de desmatamento no mundo (INPE, 2014). A expansão da soja e da pecuária constituem os principais motivos do desmatamento na Amazônia brasileira (Gollnow & Lakes, 2014). A expansão da fronteira agrícola tem causado impactos ambientais relevantes (Silva et al., 2010; Spera et al., 2016), principalmente com o desmatamento de florestas nativas (Ferreira et al., 2013; Ferreira & Coelho, 2015).

A agricultura é um tema de pesquisa importante tanto nos países desenvolvidos como nos países em desenvolvimento, sendo uma questão extremamente relevante e sensível. É notória a necessidade da expansão agrícola para suprir a demanda alimentícia da população mundial, porém, a mesma deve estar aliada à necessidade de minimização dos impactos ao meio ambiente. Nas últimas décadas, nota-se uma maior consciência da população para as práticas sustentáveis, em particular para mitigação das mudanças climáticas e para a conservação da biodiversidade (Tilman et al., 2011). As grandes áreas desmatadas para o uso agrícola intensificam o aquecimento global e a extinção de inúmeras espécies. Neste contexto, propostas para desenvolvimento agrícola sustentável estão sendo projetadas nas agendas políticas (Franks, 2014). Por exemplo, estratégias de comando e controle, como a adoção de políticas de crédito condicional, são mecanismos relevantes para conter o desmatamento ilegal (Assunção et al., 2012; Macedo et al., 2012).

Desta forma, mediante a relevância de se produzir uma maior quantidade de alimentos com menor impacto ao meio ambiente, um grande número de pesquisas agrícolas são realizadas constantemente no mundo. A produção de culturas agrícolas em território brasileiro é fator chave para o atendimento das demandas futuras da população

mundial. A região brasileira conhecida pelo acrônimo Matopiba é considerada a nova fronteira agrícola do país, com áreas favoráveis para a agricultura. Assim sendo, é de grande relevância a compreensão da dinâmica espaço-temporal das culturas e seus agrupamentos espaciais constituídos no decorrer do tempo, para auxiliar nos planejamentos agrícolas, ambientais e econômicos no Brasil e no mundo.

### **1.3 Hipótese**

A dinâmica espaço-temporal da produção e produtividade da cultura de soja na região do Matopiba seguem padrões espaciais que variam ao longo do tempo. Tais padrões espaciais podem ser utilizados na avaliação da migração da aptidão à cultura da soja entre os municípios pertencentes à região do Matopiba.

### **1.4 Objetivos**

O objetivo geral dessa pesquisa é analisar as dinâmicas espaço-temporais da produção e produtividade da soja na região do Matopiba, no período de 1990 a 2015, com o uso de técnicas da estatística espacial de áreas para séries temporais. Como objetivos específicos, têm-se:

- ✓ Caracterizar espaço-temporalmente as variáveis de produção e produtividade da cultura de soja na região do Matopiba;
- ✓ Observar a dependência espacial entre os municípios produtores de soja na área de estudo; e
- ✓ Analisar os agrupamentos espaciais de alta produção/produtividade e baixa produção/produtividade de soja constituídos no decorrer do tempo na região do Matopiba.

### **1.5 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação foi estruturada em cinco capítulos, sendo estes: considerações iniciais; caracterização da área de estudo; fundamentação teórica; artigo -

dinâmica espaço-temporal da soja na região do Matopiba, Brasil (1990-2015); e as considerações finais.

No primeiro capítulo, fez-se uma apresentação geral, onde foram abordadas as justificativas da presente dissertação, os objetos de investigação, a hipótese e os objetivos da pesquisa. No segundo capítulo, consta a descrição das principais características biofísicas, ambientais e econômicas da região do Matopiba. No terceiro capítulo, foi realizada a revisão bibliográfica acerca dos principais conceitos, metodologias e aplicações tratadas nesta dissertação, a nível mundial, regional e local. O quarto capítulo compreende o artigo a ser submetido em uma revista indexada, no qual se analisou a dinâmica espaço-temporal da cultura de soja na região do Matopiba, entre os anos de 1990 a 2015. No último capítulo, são abordadas as considerações finais da presente dissertação e sugestões para futuros trabalhos.

## CAPÍTULO 2

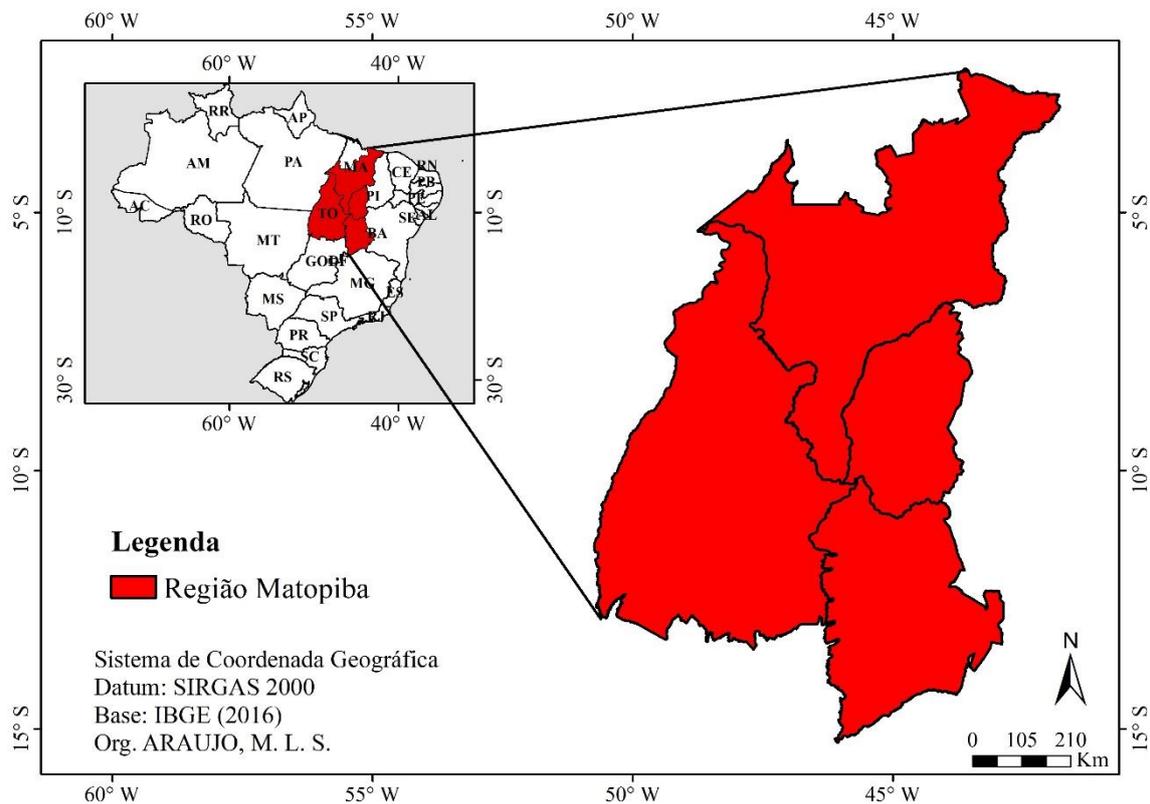
### CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

---

A região do Matopiba engloba parcialmente quatro estados brasileiros, o Maranhão, o Tocantins, o Piauí e a Bahia, e recebeu esse nome devido à soma das iniciais dos estados que a constitui. Com menor intensidade, principalmente entre os estrangeiros, essa região também é conhecida como Mapitoba e Mapito. O Matopiba é uma delimitação geográfica que é considerada como a última fronteira agrícola do mundo (Santos Filho et al., 2016), cooperando diretamente com o sucesso do Brasil no agronegócio.

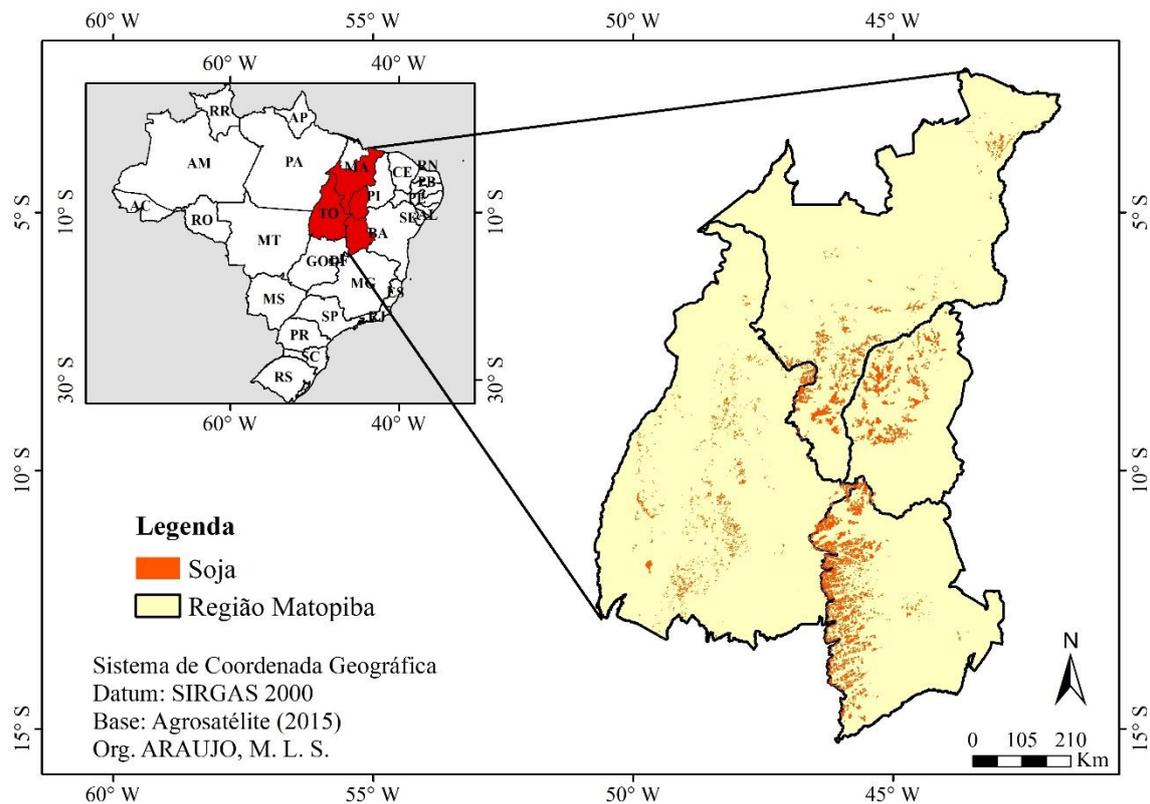
O Matopiba sofreu elevadas transformações nos últimos 20 anos e apresentou destaque na produção de grãos no mercado internacional. Dentro desse contexto, o governo brasileiro e as instituições públicas e privadas notaram a necessidade de oficializarem a delimitação do Matopiba, principalmente como forma indispensável de apoiar as políticas públicas para maiores investimentos na região. Em 2013, foi realizada a delimitação geográfica oficial do Matopiba pelo Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), em Campinas/SP. Foi utilizado como base para a delimitação do Matopiba, os limites do Cerrado e dos municípios que integram grande parte da região (Miranda et al., 2014).

Com 337 municípios ocupando mais de 73 milhões de hectares, a região do Matopiba está localizada entre as coordenadas 50° 00' e 42° 00' de longitude Oeste e 2° 30' e 15° 15' de latitude Sul (Fig. 2.1). O Matopiba abrange as regiões do Norte e Nordeste brasileiro, constituído por 51% da área dos quatro estados que o formam. Abrange 38% no Tocantins, 33% no Maranhão, 18% na Bahia e 11% no Piauí (Miranda et al., 2014). O mesmo integra 46 unidades de conservação (8.334.679 ha), 35 terras indígenas (4.157.189 ha) e 781 assentamentos de reforma agrária e áreas quilombolas (3.033.085 ha), totalizando 13.967.920 ha de áreas legais, ou seja, 19,1% da região (Miranda et al., 2014a).



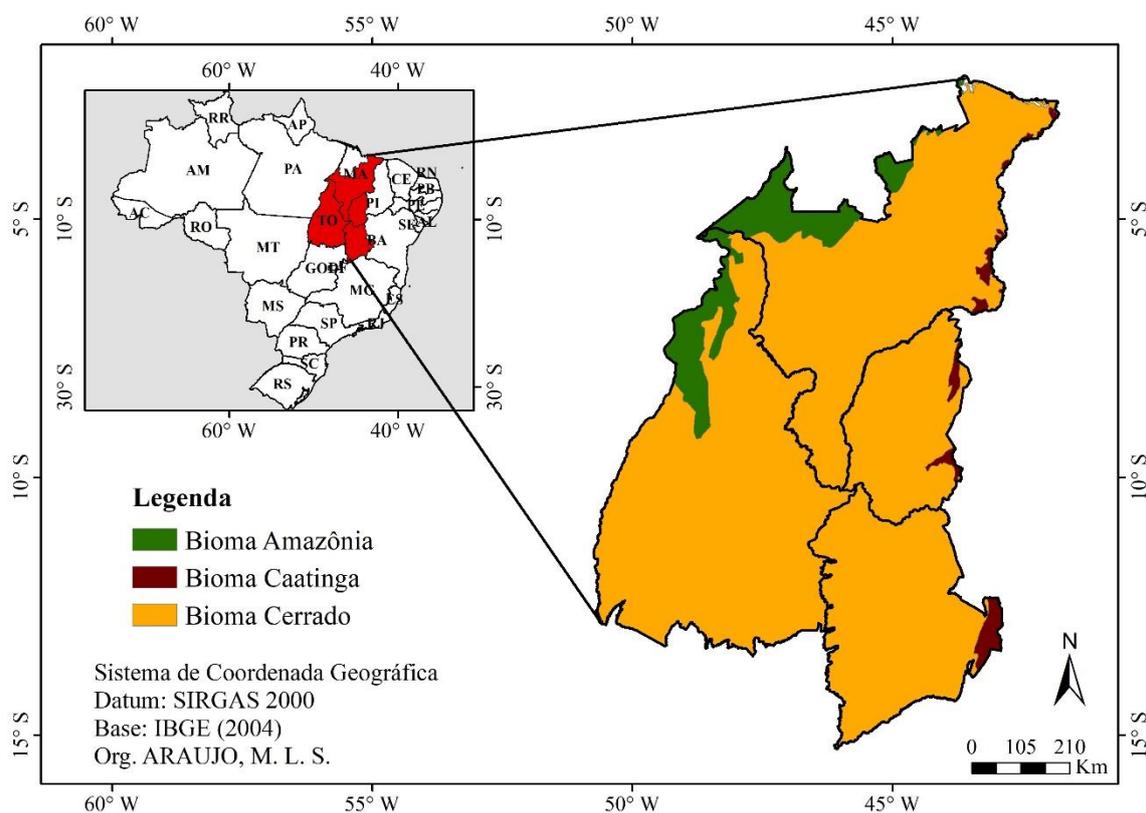
**Figura 2.1** Mapa de localização da região do Matopiba, constituído parcialmente pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Fonte: IBGE (2016a). Org.: Próprio autor.

A nova fronteira agrícola apresenta em torno de 324.326 estabelecimentos agrícolas que ocupam 33.929.100 ha (Pereira & Pauli, 2016). Segundo Agrosatélite (2015), na safra 2013/2014, a cultura da soja ocupou em torno de 3.420.144 ha da região do Matopiba (Fig. 2.2), sendo 1.438.335 ha na Bahia, 683.462 ha no Maranhão, 678.604 ha no Tocantins e 619.741 ha no Piauí. A maior mudança no uso e ocupação do solo do Matopiba foi causada pela expansão agrícola, atingindo diretamente a vegetação nativa da região. A área disponível para a expansão da soja no bioma do Cerrado é de 40,81 Mha, dos quais 15,45 Mha (5,40 Mha no Matopiba) são cobertas por vegetação nativa e 25,36 Mha (2,81 Mha no Matopiba) são áreas previamente perturbadas (Agrosatélite, 2015).



**Figura 2.2** Mapa da área cultivada com a 1ª safra de soja na região do Matopiba (safra 2013/14). Fonte: Agrosatélite (2015). Org.: Próprio autor.

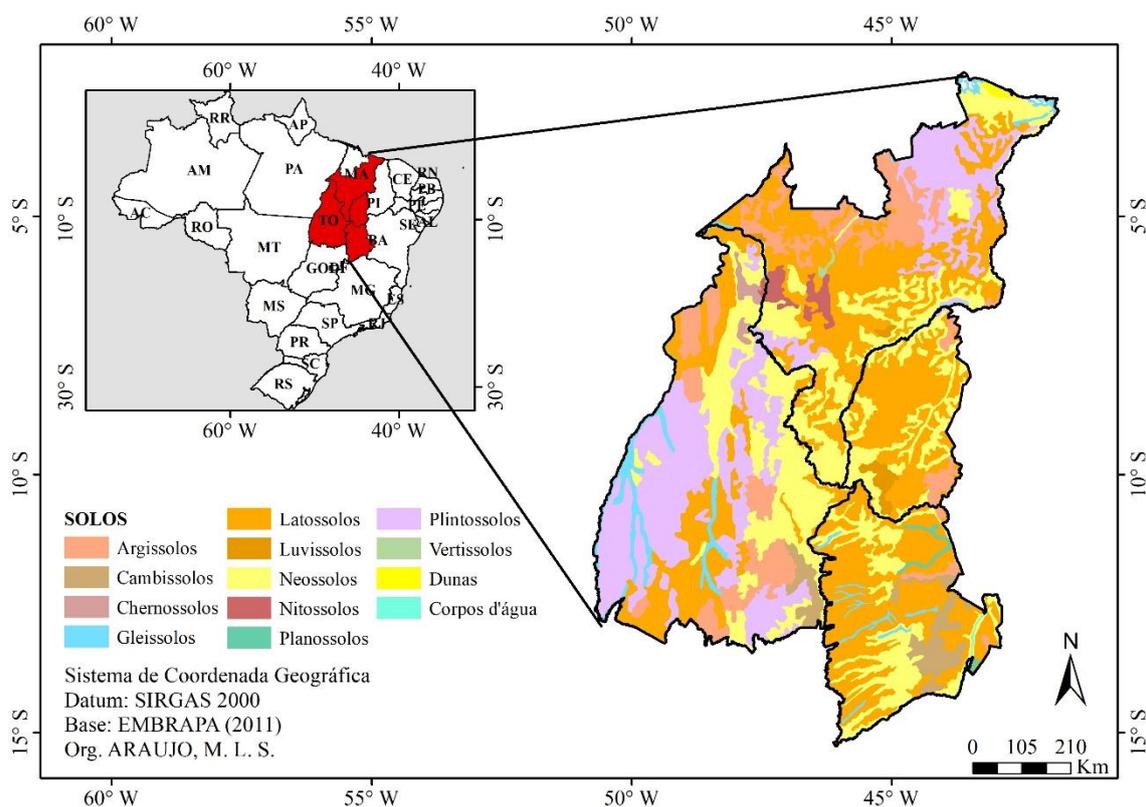
O Matopiba é formado por três biomas brasileiros, sendo, em sua maioria, o bioma Cerrado, com 66.543.540 ha e 91% da sua área de abrangência. Também é constituído pelo bioma Amazônia, que agrega 5.319.628 ha e cerca de 7,3% do território do Matopiba, e pelo bioma Caatinga, com 1.203.107 ha e aproximadamente 1,7% de sua extensão (Magalhães & Miranda, 2014) (Fig. 2.3). As áreas do Matopiba pertencentes ao bioma Cerrado abrangem formações florestais, savânicas e campestres. Cerca de 62% da região do Matopiba constituem áreas da Amazônia Legal, delimitação política-administrativa criada pela Lei n° 1.806 de 6 de janeiro de 1953 (Magalhães & Miranda, 2014). De acordo com o novo Código Florestal Brasileiro, instituído pela Lei n° 12.651 de 25 de maio de 2012, 20% e 35% das propriedades rurais inseridas nas áreas de bioma Cerrado e Amazônia, respectivamente, devem ser protegidas. Desta maneira, pode-se ocorrer a expansão agrícola com preservação de áreas florestais.



**Figura 2.3** Distribuição do Matopiba nos três biomas que integram essa região. Fonte: IBGE (2004). Org.: Próprio autor.

O conhecimento dos diferentes tipos de solos é fundamental para a produção de alimentos. O preparo incorreto do solo constitui um dos principais problemas ao desenvolvimento agrícola sustentável. Conforme Torres et al. (1993), a maioria dos solos brasileiros são rapidamente degradados pelas operações de preparo do solo, principalmente devido ao baixo número de nutrientes nas camadas superficiais do solo e a elevada dependência de matéria orgânica. De acordo com Fernandes (2017), a distribuição das diferentes paisagens do Cerrado é controlada pela textura, baixa disponibilidade de nutrientes e pequena profundidade de alguns solos.

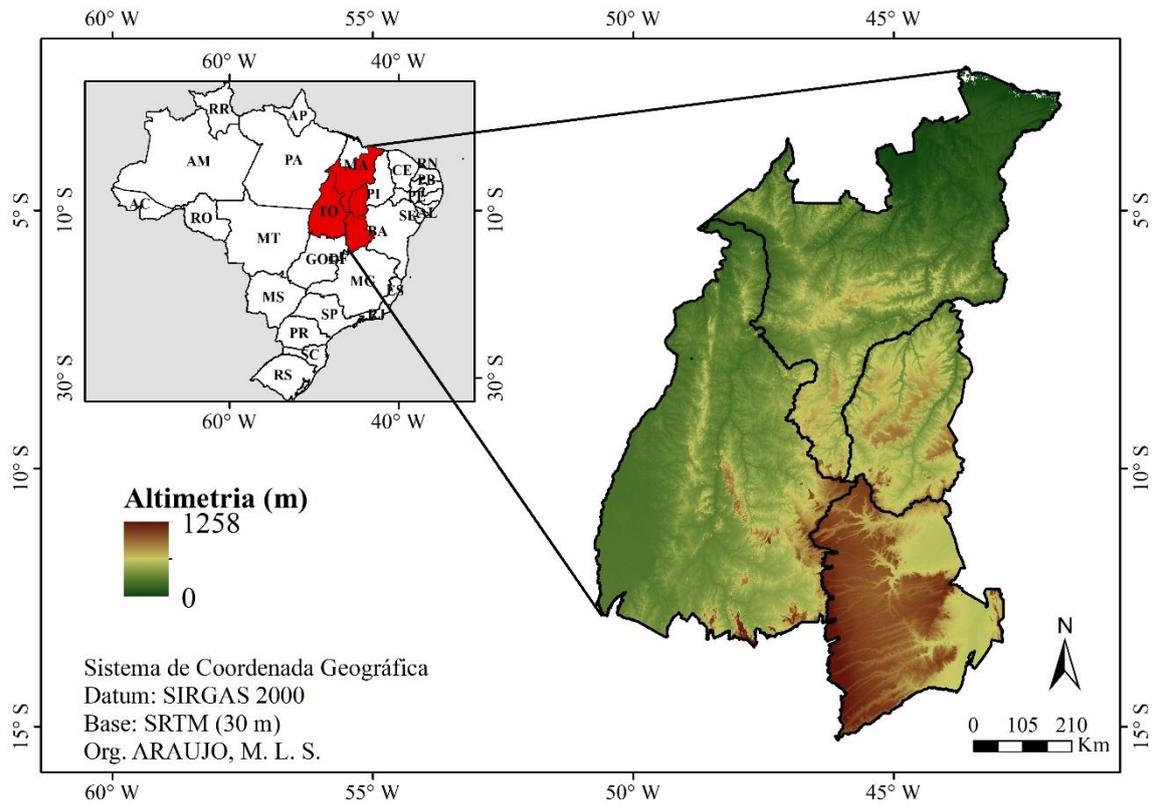
A área do Matopiba apresenta 12 tipos de solos (Fig. 2.4), predominando os Latossolos, Neossolos e Plintossolos. Na forma de manchas menores, são encontrados ainda os solos da ordem Argissolos, Gleissolos, Cambissolos, Nitossolos, Luvisolos, Chernossolos, Planossolos, Dunas e Vertissolos.



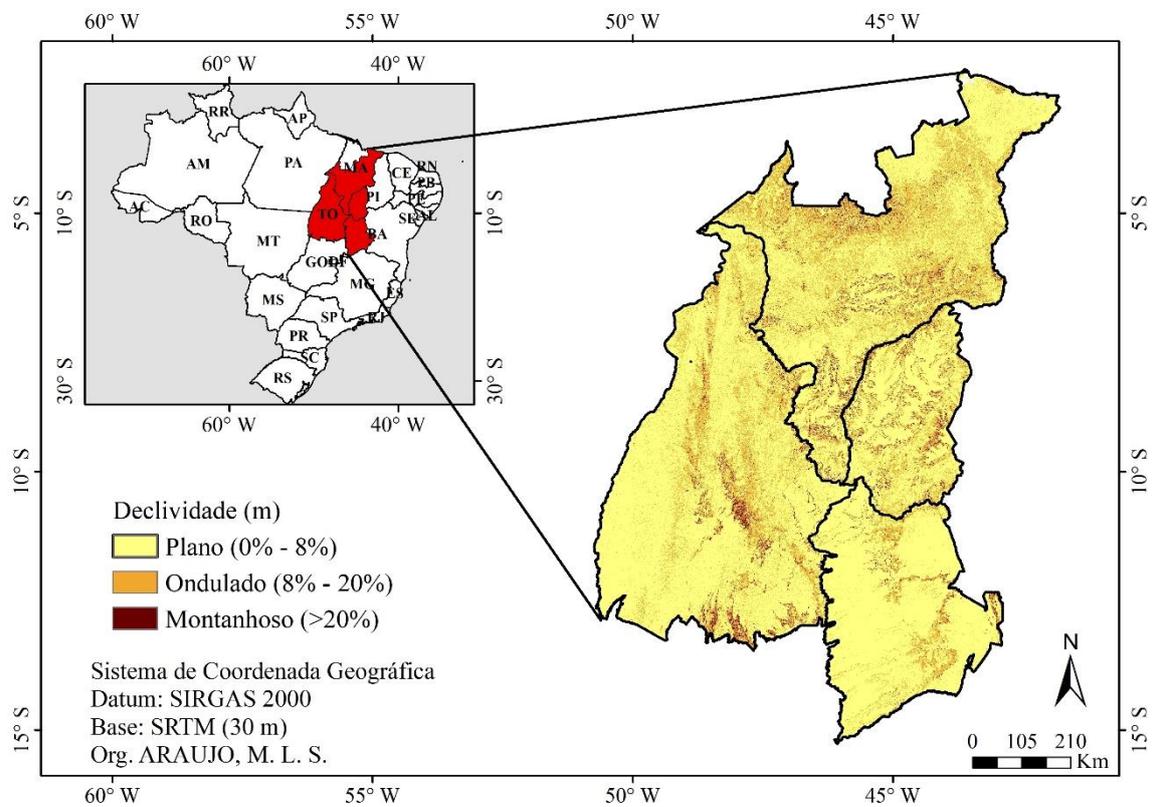
**Figura 2.4** Mapa de solos da região do Matopiba. Fonte: Embrapa (2011). Org.: Próprio autor.

O Latossolo é a ordem predominante na região do Matopiba, com 27.775.695 ha, representando 38% do seu território (Magalhães & Miranda, 2014). Os Latossolos são solos bem desenvolvidos e profundos, com elevado intemperismo e que, em geral, apresentam baixa fertilidade, boa permeabilidade e alta porosidade, as quais são características físicas favoráveis ao uso agrícola. A segunda maior classe encontrada na região do Matopiba é o Neossolo, caracterizado como solos pouco desenvolvidos. O mesmo ocupa uma área de 17.975.780 ha, isto é, aproximadamente 25% da região (Magalhães & Miranda, 2014). A terceira maior classe é o Plintossolo, com uma área de 14.079.285 ha (19,2% da região). O mesmo possui uma baixa fertilidade natural, principalmente pela sua elevada acidez.

Em relação à altitude, o Matopiba apresenta uma variação de 1 a 1.254 metros acima do nível do mar (Fig. 2.5). As áreas mais baixas da região são observadas no Norte maranhense e as áreas mais elevadas, no Extremo Oeste baiano. A declividade da região do Matopiba é, em sua maior parte, plana, com variações de zero a 3% de declividade (Fig. 2.6), ou seja, uma declividade favorável à mecanização das atividades agrícolas.

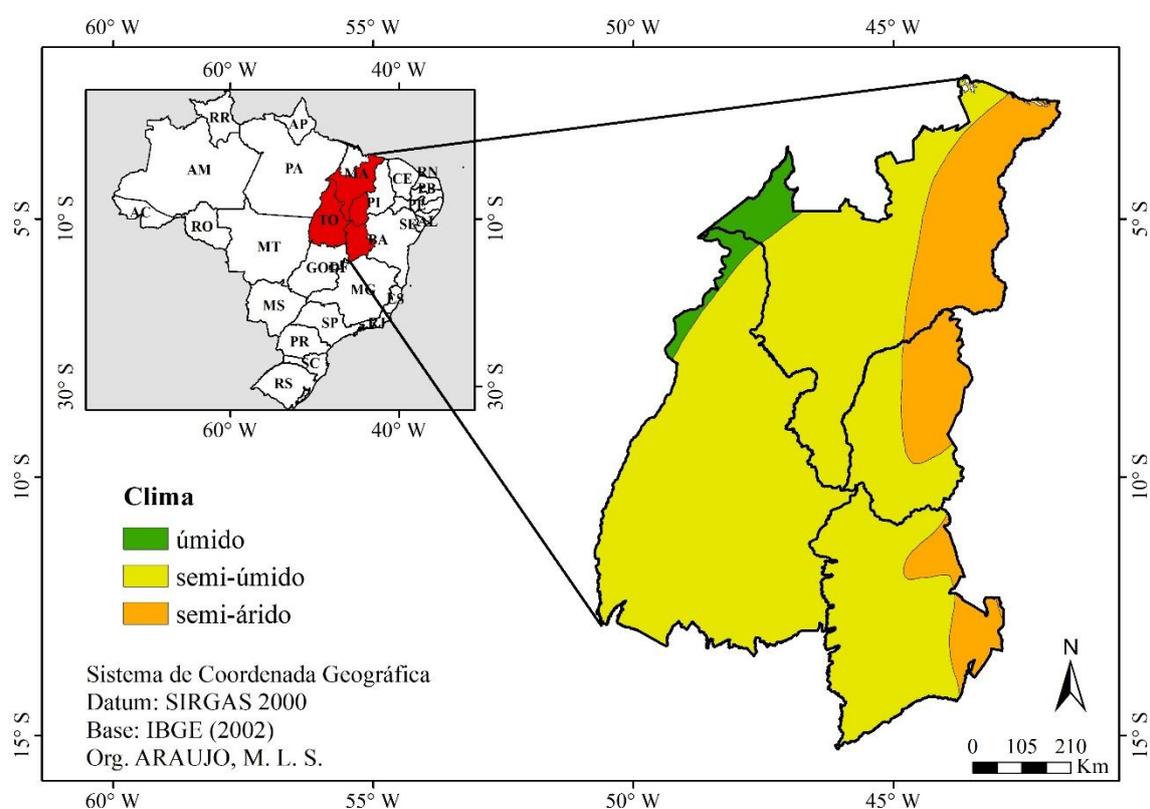


**Figura 2.5** Mapa altimétrico da região do Matopiba. Base: SRTM (30 m). Org.: Próprio autor.



**Figura 2.6** Mapa de declividade da região do Matopiba. Base: SRTM (30 m). Org.: Próprio autor.

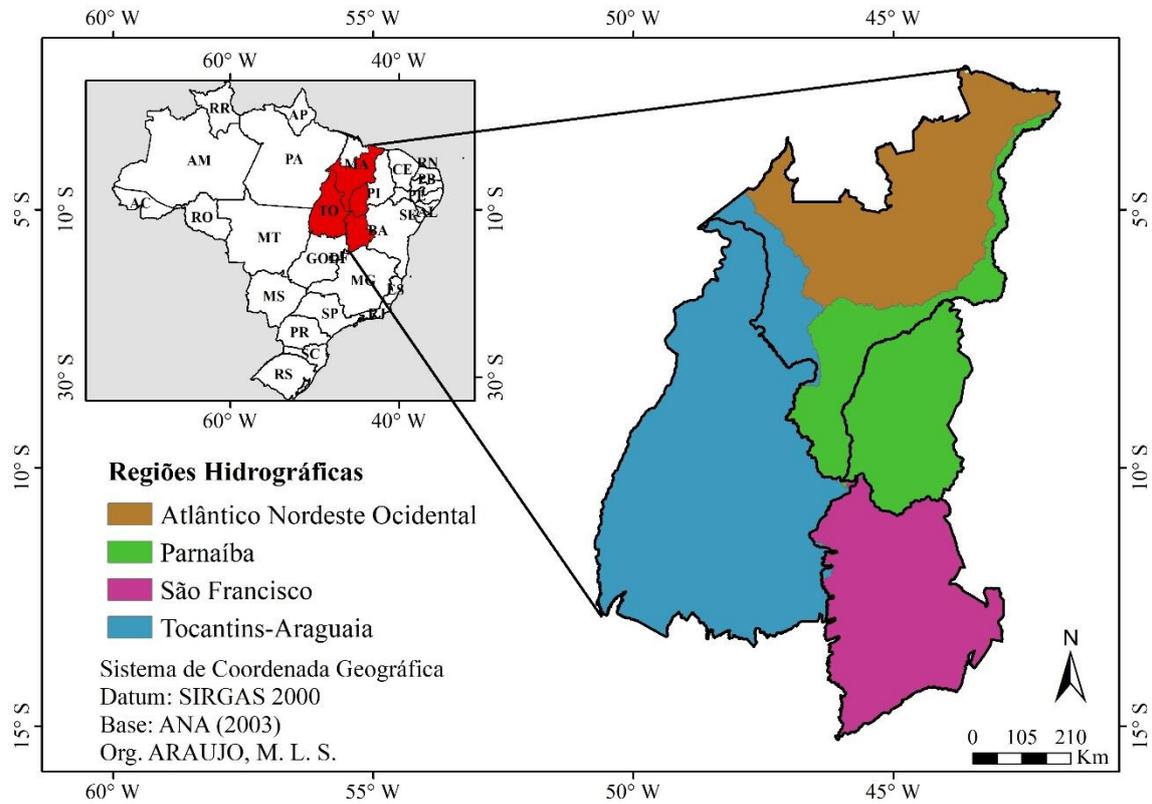
A região do Matopiba apresenta três tipos de clima: úmido, semiúmido e semiárido (Fig. 2.7). Com aproximadamente 78% do território do Matopiba, principalmente na sua região central, o clima tropical semiúmido possui períodos de seca de até cinco meses e temperaturas médias acima de 18°C em todos os meses do ano (Magalhães & Miranda, 2014). O clima semiárido, localizado na região leste do Matopiba, apresenta baixa precipitação e umidade, além de temperaturas médias acima de 18°C em todos os meses do ano (Magalhães & Miranda, 2014). As unidades climáticas que integram a região do Matopiba são: zona climática equatorial (3%), tropical equatorial (44%) e tropical Brasil central (53%) (Magalhães & Miranda, 2014).



**Figura 2.7** Mapa climático da região do Matopiba. Fonte: IBGE (2002). Org.: Próprio autor.

O Matopiba está integrado na bacia do rio Tocantins, com 43% da área de estudo; na bacia do Atlântico Norte/Nordeste, com 40% do total da região; e na bacia do rio São Francisco, com 17% da área de estudo (Magalhães & Miranda, 2014). Os principais rios que cortam o Matopiba são: Tocantins, Araguaia, São Francisco, Parnaíba, Itapecuru, Mearim, Gurupi e Pindaré. As regiões hidrográficas que ocorrem no Matopiba, segundo o Plano Nacional de Recursos Hídricos, são: Atlântico Nordeste Ocidental, Parnaíba, São

Francisco e Tocantins-Araguaia (Fig. 2.8). Hidrologicamente, a região do rio São Francisco é de extrema relevância para a região Nordeste do Brasil, com elevado volume de água transportada para o semiárido. A região hidrográfica do Parnaíba apresenta o maior potencial hídrico da região.



**Figura 2.8** Mapa hidrogeográfico da região do Matopiba. Fonte: ANA (2003). Org.: Próprio autor.

A agricultura faz parte da base nutricional essencial da população mundial, é suporte da economia de vários países e é uma das atividades com maior interferência aos ecossistemas. Logo, os planejamentos agrícolas, com base em estudos regionais, são essenciais em prol do desenvolvimento agrícola de forma sustentável e para o fornecimento suficiente de alimentos para atender a demanda populacional mundial.

Desta maneira, com o objetivo de organizar as informações de artigos indexados, livros, relatórios, entre outros, para subsidiar a fundamentação teórica da atual pesquisa, abordaram-se os seguintes tópicos: cultura de soja; exigências agrometeorológicas da cultura de soja; expansão da soja no Brasil; sistemas de informações geográficas (SIG); e índice de Moran.

### **3.1 Cultura de soja**

A cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma leguminosa que se originou na costa leste da Ásia, sobretudo ao longo do rio Yangtze, na China, há mais de cinco mil anos. A mesma pertence à ordem *Fabales*, família *Fabaceae* (*Leguminosae*), subfamília *Faboideae* (*Papilionoideae*), gênero *Glycine* e espécie *Glycine max* (Sedyama, 2009). Trata-se de uma leguminosa rica em proteínas, fibras, vitaminas, minerais e isoflavonoides e é considerada um alimento funcional (Zakir & Freitas, 2015). Estudos recentes revelam que o consumo de soja traz benefícios no tratamento de algumas doenças crônicas como câncer, doenças cardiovasculares, osteoporose, doenças renais e manifestações de menopausa (Carvalho, 2014).

A soja possui um ciclo anual que varia entre 75 a 210 dias. Para as variedades geneticamente modificadas e adaptadas às condições ambientais do Brasil, o ciclo da cultura é de 90 a 150 dias (Sedyama, 2009). A cultura de soja possui quatro fases de crescimento, o estágio inicial, que começa no plantio e vai até atingir ~ 10% de cobertura do solo, o estágio de desenvolvimento, que vai até o início da floração, o estágio médio, que vai até o início da maturação (enchimento dos grãos) e o estágio final, que vai até a colheita (Allen et al., 1998).

Segundo Fehr e Caviness (1977), as fases de crescimento da soja são classificadas em estágio vegetativo (VE, VC, V1, V2... Vn) (Tabela 3.1) e estágio reprodutivo (R1,

R2, R3,..., R8) (Tabela 3.2). O ponto de maturação fisiológica é caracterizado pelo estágio reprodutivo R7. No estudo realizado por Ritchie et al. (1982), foi elaborada uma nova escala fenológica que foi baseada na proposta do Fehr e Caviness (1977), subdividindo-se os estádios R5, R7 e R8 com o objetivo de elevar a precisão na identificação das fases de desenvolvimento da cultura.

**Tabela 3.1** Descrição dos estádios vegetativos da soja.

<b>Estádio</b>	<b>Denominação</b>	<b>Descrição</b>
VE	Emergência	Cotilédones acima da superfície do solo
VC	Cotilédone	Cotilédones completamente abertos
V1	Primeiro Nó	Folhas unifolioladas e completamente desenvolvidas
V2	Segundo Nó	Primeira folha trifoliolada e completamente desenvolvida
V3	Terceiro Nó	Segunda folha trifoliolada e completamente desenvolvida
V...	...	...
Vn	Enésimo Nó	Ante-enésima folha trifoliolada e completamente desenvolvida

Fonte: Fehr e Caviness (1977).

**Tabela 3.2** Descrição dos estádios reprodutivos da soja.

<b>Estádio</b>	<b>Denominação</b>	<b>Descrição</b>
R1	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó da haste
R2	Florescimento pleno	Uma flor aberta em um dos dois últimos nós da haste
R3	Início da formação da vagem	Vagem com 5 cm
R4	Vagem completamente desenvolvida	Vagem com 2 cm
R5	Início do enchimento do grão	Grão com 3 mm
R6	Grão verde ou vagem cheia	Uma vagem contendo grãos verdes
R7	Início da maturação	Uma vagem normal na haste principal (coloração de madura)
R8	Maturação plena	95% das vagens com coloração de madura

Fonte: Fehr e Caviness (1977).

A identificação dos estádios de desenvolvimento da soja ocorre por meio do reconhecimento e contagem dos nós do caule (Monteiro, 2011). Os mesmos são estruturas protuberantes, disassociadas e dispostas ao longo do caule da leguminosa que dão origem às folhas e às flores. A contagem dos nós é iniciada pelo caule principal e deve incluir todas as folhas desenvolvidas. De acordo com Alvarez Filho (1988), a folha da soja é classificada como desenvolvida quando os bordos dos folíolos da folha do nó não tocam o mesmo, estando ligeiramente superiores.

A definição das datas fenológicas da soja é de extrema relevância para o detalhamento do ciclo da cultura e a duração média das suas fases, sendo base para outras atividades no campo, como a previsão das consequências de um evento climático para a cultura, os processos de adubações de cobertura e os tratamentos fitossanitários, entre outros. Conforme Alvarez Filho (1988), a soja apresenta um sistema radicular axial, ou seja, possui raiz principal pivotante, da qual nascem as raízes secundárias. O mesmo autor relata que a soja apresenta três tipos de folhas durante a sua fase de desenvolvimento. As folhas cotiledonares são as primeiras folhas e surgem após a germinação, em número de duas; após as cotiledonares, surgem as folhas simples e opostas, também em número de duas; e posteriormente, surgem as folhas compostas trifolioladas, que apresentam pecíolos grandes, são alternadas e possuem comprimentos de aproximadamente 7 a 15 cm.

As flores da soja são do tipo hermafrodita e nascem nas axilas das folhas ou no ápice das ramificações do caule. A soja possui fruto do tipo vagem, de coloração amarelada a preta. As vagens apresentam duas ou três sementes por pedúnculo. O tamanho e a forma das sementes variam de acordo com a variedade cultivada. As mesmas podem apresentar coloração verde, preta, amarela, castanha ou bicolor (Alvarez Filho, 1988).

### **3.2 Exigências agrometeorológicas da cultura de soja**

A formação e o crescimento da soja estão relacionados com diversos aspectos, tais como a época de semeadura, as condições climáticas, a latitude, a altitude, o tipo de solo e a utilização de tecnologias para manejo, principalmente no controle de plantas daninhas, pragas e doenças bacterianas e fúngicas. Apesar de ser uma cultura que se originou em clima temperado, vários estudos de melhoramento genético permitiram a sua adaptação agrônômica em condições climáticas subtropicais e tropicais. Por isso, a soja vem

sofrendo inúmeras e constantes mudanças morfológicas e fisiológicas para satisfazer a produtividade de diferentes regiões.

Segundo Thomas (1994), a radiação solar é essencial para a fotossíntese e para variados processos fisiológicos da soja, como o alongamento da haste principal e das ramificações, expansão foliar e nodulação (Câmara, 1998). De acordo com a Embrapa (2013), a temperatura ideal para o desenvolvimento da cultura de soja é de 30 °C, com condições ótimas entre 20 °C e 30 °C. A mesma possui um desenvolvimento baixo ou nulo em temperaturas menores ou iguais a 10 °C. As temperaturas acima de 40 °C provocam perdas na floração e reduzem a aptidão de retenção das vagens. Em altas temperaturas e elevada umidade, ocorre ainda uma queda na qualidade da semente. Em baixa umidade, há maiores indícios de problemas mecânicos durante a colheita (Embrapa, 2013). Além disso, em períodos chuvosos e de elevada umidade, com baixas temperaturas, ocorre um atraso na colheita da soja, com retenção foliar.

No mesmo estudo da Embrapa (2013), relata-se que a temperatura do solo ideal para a semeadura rápida e uniforme da soja é de 25 °C, com condições adequadas entre 20 °C a 30 °C. As temperaturas do solo abaixo de 20 °C durante a semeadura prejudicam a germinação e a emergência da cultura de soja. A fase de floração da soja é induzida apenas em temperaturas do solo acima de 13 °C. Em temperaturas do solo mais elevadas, ocorre a floração precoce da soja, com diminuição na sua altura.

Além da limitação na fase de desenvolvimento pela temperatura, a mesma também apresenta sensibilidade ao fotoperíodo (Bonato et al., 1998) e à disponibilidade hídrica. Cultivares diferentes na mesma localidade e época de semeadura apresentam datas de floração diferentes em consequência da resposta às variáveis citadas. Aproximadamente 90% do peso da cultura de soja é constituído de água (Embrapa, 2013). A mesma executa papel essencial na manutenção do calor, além de ser um solvente para a cultura, onde minerais, gases e demais solutos entram nas células e movem-se por todas as partes da cultura. De acordo com Cunha et al. (1998), a disponibilidade de água para a cultura de soja é um dos fatores responsáveis pela garantia de altos ou baixos rendimentos, dependendo da sua disposição ao longo dos diferentes estádios da cultura. Em outras palavras, a deficiência hídrica ou o excesso de água prejudica o desenvolvimento da cultura e conseqüentemente a produtividade agrícola da região.

Conforme Passioura (1983), o período em que a planta absorve água é mais relevante para o seu rendimento do que a quantidade que a mesma absorve durante o seu desenvolvimento. Da mesma forma, a água absorvida após o florescimento da soja está

diretamente relacionada com o índice de colheita. Segundo Rosemberg e Rinne (1986), as mudanças na disponibilidade de água podem causar alterações no metabolismo das sementes.

No estudo realizado pela Embrapa (2013), observou-se que o excesso e a deficiência de água durante a germinação-emergência da cultura de soja prejudica a uniformidade na população de plantas. Para possibilitar uma boa germinação, a cultura deve absorver no mínimo 50% de seu peso em água. Nesse mesmo período, a quantidade de água no solo não deve superar 85% do total máximo de água disponível e nem ser inferior a 50%.

A presença de água é de extrema relevância durante a época de floração-enchimento de grãos, necessitando aproximadamente de 7 a 8 mm/dia (Embrapa, 2013). Nessa fase da cultura, as deficiências hídricas provocam mudanças fisiológicas e ocasionam queda prematura de folhas e flores, além do abortamento de vagens. A soja necessita, para o seu máximo desenvolvimento e rendimento, um total entre 450 a 800 mm de água/ciclo, além de boas condições de temperatura duração o ciclo e manejo correto. Para tal, é de extrema relevância o estudo e planejamento agrícola da região em que se deseja cultivar a soja, principalmente para reduzir os efeitos da deficiência hídrica (Embrapa, 2013).

A época de semeadura é um dos fatores chave para a alta produtividade da soja, influenciando diretamente no rendimento da planta. A soja, quando semeada em época inadequada, sofre prejuízos na sua altura e no seu ciclo, elevando as perdas na colheita. De acordo com Marcos Filho et al. (1990), a depender de cada região, práticas adequadas de cultivo são essenciais, tais como a seleção de cultivares mais adaptadas às exigências térmicas e condições físico-químicas dos solos, a semeadura em época adequada para o cultivar selecionado, o controle de pragas, doenças e plantas daninhas e a utilização de espaçamentos e densidades apropriados para o cultivar escolhido, entre outras. Conforme Gilioli et al. (1995) e Martins et al. (1999), elevadas produtividades são alcançadas quando as condições ambientais são propícias em todos os estádios fenológicos da soja. Assim sendo, é essencial entender a relação entre a planta, o ambiente e o manejo adequado para obter sucesso agrícola.

### 3.3 Expansão da soja no Brasil

A cultura de soja foi introduzida no Brasil no século XIX, via Estados Unidos. A soja foi mencionada em terras brasileiras em 1882, no estado da Bahia, pelo Prof. Gustavo Dutra da Escola de Agronomia da Bahia (Zuanazzi & Mayorga, 2010). O mesmo foi responsável pelos primeiros relatos sobre a cultura de soja no Brasil e pelas primeiras pesquisas envolvendo plantio de cultivares trazidas dos Estados Unidos. Em 1891, as cultivares de soja foram levadas para São Paulo e estudadas no Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) (Rosa, 2017). Nessa época, as cultivares de soja também estavam sendo adaptadas no Rio Grande do Sul e as pesquisas obtiveram resultados promissores, em que foram encontradas excelentes condições de desenvolvimento.

Segundo Paludzyszyn Filho et al. (1993), a soja tornou-se importante no Rio Grande do Sul por causa das primeiras exportações. Em 1940, a região apareceu pela primeira vez no anuário agrícola do Estado. Em 1949, foi instalada a primeira indústria para beneficiamento da soja, na cidade de Santa Rosa (RS) (Zuanazzi & Mayorga, 2010). No início da década de 1970, observou-se o primeiro crescimento da produção de soja no país (Arantes & Souza, 1993), atingindo 1,5 milhões de toneladas. Em 1979, a produção de soja elevou-se para 15 milhões de toneladas (Zuanazzi & Mayorga, 2010) e o Brasil tornou-se o segundo maior produtor de soja no mundo, atrás apenas dos Estados Unidos (Wesz Jr., 2014). Nessa época, a produção de soja no Brasil estava concentrada nas regiões de climas temperados e subtropicais, principalmente no Sul e Sudeste do país (Boneti, 1981).

De acordo com Espíndola e Cunha (2015), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) foi criada pelo governo brasileiro em 1974 com a finalidade de expandir novos modelos tecnológicos para a agricultura e pecuária do país. Os mesmos autores relataram que, em 1975, foi inaugurada uma unidade para estudos com as cultivares de soja em Londrina-PR, chamada de Centro Nacional de Pesquisa da Soja. Tal unidade dedicou-se em realizar pesquisas para aumentar o rendimento da cultura em áreas antes tradicionais e para expandir a soja em áreas com latitudes inferiores a 15° S (Espíndola & Cunha, 2015). Assim, a Embrapa, por meio de suas pesquisas, contribuiu decisivamente para a expansão da soja em novas áreas até então classificadas como impróprias para o plantio da soja.

A partir de 1980, a soja expandiu-se para a região Centro-Oeste do Brasil, mais precisamente, nos estados do Sul do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Bahia, Oeste de

Minas Gerais e Goiás (Igreja et al., 1988). A expansão agrícola da soja no Brasil ocorreu em grande maioria nas áreas de Cerrado (Brasil Central). Tal desenvolvimento agrícola só foi possível pela elaboração de cultivares geneticamente modificados para melhor adaptação às condições edafoclimáticas da região tropical brasileira.

Conforme Dall'Agnol (2008) e Campos (2010), outros fatores também foram essenciais para a expansão da soja no Brasil Central, como os incentivos fiscais públicos para abertura de novas áreas de produção; a criação de empresas produtoras e processadoras de grãos na região; os valores baixos de terras; as extensas áreas com topografia plana, favorável à mecanização; os índices pluviométricos relativamente elevados que tornam o cultivo oportuno no verão; e um bom nível econômico e tecnológico dos produtores oriundos do Sul do país.

Após a expansão no Centro-Oeste, no final dos anos 1980 e início dos anos 1990, surgiu uma nova fronteira agrícola, constituída pelas mesorregiões do Sul maranhense, Sudoeste piauiense, Oriental do Tocantins e Extremo Oeste baiano. Essa região é conhecida pelo acrônimo Matopiba, em referência às iniciais das siglas dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Em 2015, o Matopiba produziu 10,8 milhões de toneladas de soja (IBGE, 2017).

A cultura de soja é hoje o principal produto do agronegócio brasileiro e foi direcionada para o mercado internacional. As exportações têm tido um elevado aumento no volume e na receita (Espíndola & Cunha, 2015). De acordo com as estatísticas de comércio exterior do agronegócio brasileiro (MAPA, 2017), as exportações do agronegócio no Brasil renderam U\$S 23,9 bilhões em 2001, U\$S 76,4 bilhões em 2010 e U\$S 96 bilhões em 2017. A soja contribuiu com 33% das exportações de 2017, sendo 65% direcionados ao mercado externo com a China (MAPA, 2017). A União Europeia é o segundo destino principal de grãos, com 15% do total exportado. A Espanha é o maior consumidor europeu da soja brasileira (Espíndola & Cunha, 2015).

São vários os fatores responsáveis pela importância e pelo aumento do mercado de exportação da soja no mundo (Hirakuri & Lazzarotto, 2014). Dentre eles, destacam-se, por exemplo, a grande quantidade de proteínas presentes na cultura (aproximadamente 40%), que servem para alimentação humana e animal; o elevado teor de óleo (em torno de 20%), que é direcionado para a indústria de biocombustível e alimentação; e a fácil absorção e utilização de tecnologias de produção. Conforme Espíndola & Cunha (2015), essa expansão nas exportações também é devido ao aumento da demanda da China e dos demais países em desenvolvimento e à forte valorização dos preços internacionais.

### 3.4 Sistema de informações geográficas (SIG)

No conjunto das tecnologias relacionadas à elaboração e transmissão de informações, encontram-se as geotecnologias, definidas como um conjunto de tecnologias para coleta, armazenamento, processamento, análise e disponibilização de informações com referências geográficas (Burrough et al., 2015). Elas auxiliam nos estudos sobre meio ambiente, combinando e avaliando dados das informações geográficas para uma melhor tomada de decisão (Pollo, 2013).

Desde a antiguidade, a observação e representação da superfície da Terra têm sido de grande importância na organização da sociedade (Câmara e Medeiros, 1993). O uso das tecnologias de informação auxiliam em todas as áreas do conhecimento, com constantes desafios de análises espaciais. Dentre as geotecnologias, estão os sistemas de informações geográficas (SIGs), sensoriamento remoto, cartografia digital, sistema de posicionamento global, aerofotogrametria e topografia digital. Os mesmos têm contribuído com vários métodos científicos de análise espacial envolvendo área urbana, meio ambiente e áreas agrícolas.

Segundo Câmara (1993), os SIGs são caracterizados por: "integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados de censo, de cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes, dados e modelos numéricos de terrenos; combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação, para gerar mapeamentos derivados; consultar, recuperar, visualizar e imprimir o conteúdo da base de dados geocodificados". Os SIGs são tecnologias que combinam cartografia, produtos de sensoriamento remoto, bancos de dados automatizados e modelagem (Kohori, 2017). Os mesmos são constituídos por elementos de *hardware*, *software*, processos, dados e redes que se combinam e integram uma poderosa ferramenta espacial.

O conhecimento dos aspectos físicos e históricos de uma determinada área é de suma importância na compreensão dos fenômenos e processos que ocorrem atualmente (Tabacow e Silva, 2010). Dessa maneira, os SIGs se diferenciam dos demais segmentos do geoprocessamento por sua ênfase nas análises espaciais (Burrough, 1986; Goodchild, 1987). Os mesmos auxiliam na caracterização de áreas com maior precisão, maior rapidez e menor custo, disponibilizando produtos de séries temporais com mapas digitais sobre temas diversos que podem ser apresentados por municípios e/ou regiões geográficas. As informações de distribuição espacial proporcionam a identificação da ocupação territorial

em suas múltiplas formas, sendo ferramenta base nos planejamentos das culturas agrícolas (Donzeli et al., 1992).

No estudo conduzido por Ahmadi et al. (2017), o SIG, com o uso do método de Krigagem, foi ferramenta chave no zoneamento de concentrações de metais pesados em solos agrícolas da planície de Aghili, província de Khuzestan, Irã. Xiao et al. (2015) combinaram as técnicas de SIG com as técnicas de sensoriamento remoto e modelagem para quantificar os fatores determinantes da expansão das colheitas e seus efeitos relativos na região subtropical de Hangzhou, na China, entre os anos de 1985 a 2009.

Nackoney et al. (2013) realizaram um acoplamento entre o mapeamento participativo e as técnicas de SIG para produzir o zoneamento agrícola em escala local, na República Democrática do Congo. Kurina et al. (2018) realizaram o zoneamento edafoclimático da região Córdoba, Argentina, por meio das técnicas de estatística espacial multivariadas. Os mesmos observaram que a variabilidade espacial conjunta das variáveis de solo e clima oferecem a oportunidade de delimitar zonas contíguas. Conforme Zhang et al. (2013), os SIGs fornecem ferramentas robustas para descrever as mudanças do padrão de uso da terra ao longo do tempo.

### **3.5 Índice de Moran**

A análise espacial constitui um conjunto de métodos de estudos quantitativos para averiguar as informações sobre determinada localidade, buscando descrever ou explicar o comportamento dos processos que ocorrem no espaço. Essa técnica tem como finalidade utilizar a variável espacial para explicar algum fenômeno e é muito utilizada no monitoramento ambiental e agrícola, além de contribuir na análise de diversos estudos na área da saúde.

A utilização da análise espacial envolve a seleção de dados e a manipulação dos mesmos, tanto nas análises exploratórias como nas confirmatórias. Anselin (1992) definiu a análise exploratória de dados espaciais como coleção de técnicas para descrever e visualizar distribuições espaciais, identificar situações atípicas, descobrir padrões de associação espacial (agrupamentos) e sugerir regimes espaciais ou formas de heterogeneidade espacial. A análise espacial exploratória possui, como conceito básico, a identificação da dependência e autocorrelação espacial, buscando analisar a ligação de dependência entre a ocorrência do fenômeno e a distância em que o mesmo ocorre (Câmara et al., 2004).

A estatística espacial integra a análise espacial exploratória com o objetivo de agregar valor às distintas abordagens dos dados georreferenciados. Segundo Santos (2015), a incorporação da mesma dentro dos programas de SIGs possibilita ir além da visualização do fenômeno, viabilizando as análises dos padrões espaciais. De acordo com Dalposso (2010), a geoestatística e a estatística espacial de áreas são exemplos de técnicas da estatística espacial.

A estatística de áreas analisa a dependência espacial dos dados georreferenciados, identificando se o fenômeno espacial ocorre de forma aleatória, aglomerada ou regular. A estatística espacial de áreas é representada em forma de índices que buscam analisar a autocorrelação e a associação espacial em nível global (por exemplo, índice global de Moran) e local (por exemplo, índice local de Moran, um exemplo de Indicador Local de Associação Espacial – LISA). Ambos os índices representam uma estatística inferencial, ou seja, a interpretação dos resultados ocorre no contexto de uma hipótese nula. Se a variável estudada é distribuída aleatoriamente na área de estudo, os índices aceitam a hipótese nula.

O índice global de Moran ( $I$ ) foi desenvolvido em 1950 e recebeu esse nome em homenagem ao seu criador, o estatístico australiano Patrick Alfred Pierce Moran (Moran, 1950). O índice global de Moran é uma medida que analisa a autocorrelação espacial entre o vizinho do fenômeno no espaço, avaliando se a distribuição ocorre de forma aleatória ou não (Anselin, 2005). O mesmo realiza os cálculos com base nas características quantitativas das áreas espaciais. Segundo Almeida (2012), a autocorrelação espacial representa que cada valor apresentado por uma variável de interesse em uma localidade aproxima-se do valor dessa variável em outras localidades vizinhas. O índice global de Moran é dado pela função:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{S_o \sum_{i=1}^n z_i^2} \rightarrow s_o = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} \quad (1)$$

No qual  $w_{i,j}$  é o peso atribuído conforme a conexão entre as áreas  $i$  e  $j$ ;  $z_i$  é o desvio de um atributo para o recurso  $i$  da sua média;  $z_j$  é o desvio de um atributo para o recurso  $j$  da sua média;  $S_o$  é o agregado de todos os pesos espaciais e  $n$  é o número total de atributos. O resultado do índice de Moran varia de -1 a +1, determinando o grau de

autocorrelação existente entre a região do fenômeno e sua vizinhança, sendo positivo para correlação direta e negativo quando inversa (Câmara et al., 2002).

O índice local de Moran ( $I_i$ ) é uma medida de arranjo espacial que avalia a correlação entre a observação do fenômeno e sua vizinhança (Anselin, 1995). O mesmo é baseado na matriz de vizinhança gerada com os vizinhos de primeira ordem, no qual permite identificar os padrões significativos de associação espacial e realiza uma decomposição espacial do índice global de Moran (Magalhães & Medronho, 2017). O índice local de Moran possui ferramentas que permitem capturar padrões locais de autocorrelação espacial (Almeida, 2012) e apresenta um valor específico para cada objeto, possibilitando a observação dos agrupamentos espaciais de valores semelhantes (*clusters*) ou objetos anômalos (*outliers*). Para Zhang e Lin (2016), os *clusters* de valores baixos indicam desigualdade na região. O índice local de Moran é dado pela função:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j} (x_j - \bar{x}) \rightarrow s_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{x})^2}{n - 1} - \bar{x}^2 \quad (2)$$

No qual  $w_{i,j}$  é o peso atribuído conforme a conexão entre as áreas  $i$  e  $j$ ;  $x_i$  é o valor do atributo considerado na área  $i$ ;  $x_j$  é o valor do atributo considerado na área  $j$ ;  $\bar{x}$  é a média do atributo correspondente e  $n$  é número total de atributos.

No estudo realizado por Clemente et al. (2017), os autores fizeram uso das técnicas de estatística espacial, por meio dos índices global e local de Moran para analisar o comportamento da produção, área plantada, área colhida e produtividade do feijão no Brasil. Os mesmos observaram que a dinâmica da produção de feijão mostrou padrões diferentes ao longo de 1990 a 2013, o que não permitiu a definição de um modelo nacional único. Porém, apesar da área colhida de feijão no Brasil ter se expandido lentamente ao longo do período estudado, a quantidade produzida e o rendimento médio das culturas mostraram uma tendência crescente ao longo dos anos.

Fan et al. (2017) avaliaram a dinâmica da paisagem utilizando imagens anuais do satélite Landsat e técnicas de estatística espacial, na região de Phoenix, Arizona. Os autores utilizaram o índice local de Moran nos pixels das imagens da série temporal para observar os agrupamentos espaciais urbanos, além da técnica de estatística não-paramétrica para séries temporais, conhecida como Mann Kendall (Kendall, 1975), para

avaliar a tendência de crescimento dos mesmos. Assim, os autores concluíram que ocorreu uma extensa conversão de terra dos campos agrícolas para áreas urbanas.

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA SOJA NA REGIÃO DO MATOPIBA,**  
**BRASIL (1990-2015)**

*(Artigo a ser submetido no Land Use Policy ou Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental)*

**Resumo:** A cultura da soja é uma das principais *commodities* agrícolas do Brasil. A expressão "Matopiba" corresponde à região formada pelas mesorregiões Sul maranhense, Sudoeste piauiense, Oriental do Tocantins e Extremo Oeste baiano e é considerada a nova fronteira agrícola do país. O presente trabalho analisou a dinâmica espaço-temporal da produção e produtividade da soja na região do Matopiba. Foram analisados os dados municipais e anuais de área plantada, área colhida e produção, obtidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em uma série temporal de 1990 a 2015. A produtividade foi estimada a partir dos dados de produção e área plantada. Os dados foram espacializados e analisados por meio das técnicas de estatística espacial, denominadas de índice global e local de Moran. Os resultados evidenciaram uma autocorrelação positiva e significativa no início da série temporal entre os municípios produtores da soja no Extremo Oeste baiano. Essa região influenciou a expansão da soja no sentido de sul para norte. Atualmente, as áreas de produção se concentram em dois blocos autocorrelacionados, uma na região do Extremo Oeste baiano e outra na região central do Matopiba. A análise de autocorrelação espacial envolvendo produtividade apresentou uma tendência de decréscimo no final da série temporal, com destaque para a mesorregião Sul maranhense. Foram observados ainda *outliers* de municípios com alta produtividade rodeados de municípios com baixa produtividade e vice-versa. Esse estudo permitiu concluir que a produção e a produtividade da soja não ocorrem de forma aleatória na região do Matopiba.

**Palavras-chave:** Fronteira agrícola, Geoprocessamento, Análise Temporal, Estatística Espacial.

**Abstract:** Soybean cultivation is one of the main agricultural *commodities* in Brazil. The expression "Matopiba" corresponds to the region formed by the Sul maranhense, Sudoeste piauiense, Oriental do Tocantins and Extremo Oeste baiano mesoregions and is considered the new agricultural frontier of the country. The present work analyzed the spatial and temporal dynamics of soybean production and productivity in the Matopiba region. We analyzed the municipality-based annual planting, harvesting and production data obtained by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), in the 1990-2015 time series. Productivity was estimated from the production data and planted area. The data were spatialized and analyzed using the spatial statistics techniques called global and local Moran indices. The results showed a positive and significant autocorrelation at the beginning of the time series among the municipalities located in the Extremo Oeste baiano mesoregion. This region influenced soybean expansion from south to north. Currently, the production areas are concentrated in two autocorrelated blocks, one in the Extremo Oeste da Bahia and the other in the central region of Matopiba. The analysis of spatial autocorrelation involving productivity showed a decreasing trend at the end of the time series, with emphasis on the Sul maranhense mesoregion. Outliers of municipalities with high productivity surrounded by municipalities with low productivity were also observed and vice-versa. This study allowed us to conclude that soybean production and yield do not occur randomly in the Matopiba region.

Keywords: Agricultural frontier, Geoprocessing, Temporal analysis, Spatial statistics.

#### **4.1 Introdução**

O Brasil é um país de grande extensão territorial e está entre as dez maiores economias mundiais (FMI, 2017), sendo considerado um dos líderes mundiais na produção e exportação de grãos (MAPA, 2016a). Com condições adequadas para o desenvolvimento do setor agrícola, o Brasil alcançou um forte crescimento nas últimas três décadas, e atualmente, é o segundo maior exportador agrícola mundial. Em 2015, as três culturas anuais que apresentaram as maiores áreas plantadas no Brasil foram a soja (32 milhões de hectares), o milho (16 milhões de hectares) e a cana-de-açúcar (10 milhões de hectares) (IBGE, 2015).

A cultura de soja é uma das principais culturas de sequeiro no Brasil, considerada um suporte para a estabilização e consolidação da economia nacional. O Brasil tornou-se

o segundo maior produtor de soja do mundo depois dos Estados Unidos, com uma colheita de 65,8 milhões de toneladas por ano (FAO, 2014; EMBRAPA, 2017). A partir das análises de tendências da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), estima-se que a produção brasileira de soja deva aumentar 37% nos próximos 10 anos (OCDE/FAO, 2015). Parte desse aumento irá suprir a crescente demanda global de alimentos, que, em 2030, exigirá de 175 milhões a 220 milhões de hectares de terras agrícolas (FAO, 2003; Dobbs et al., 2011; IFPRI, 2013).

Atraídos por preços relativamente baixos da terra, qualidade do solo, topografia complacente à mecanização e progressivas melhorias nas políticas públicas, novas fronteiras agrícolas foram criadas e o Brasil tornou-se competitivo nos mercados internacionais (Vera-Diaz et al., 2008). Os progressivos estudos de melhoramento genético realizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e as análises de riscos climáticos contribuíram para a expansão da cultura de soja nas regiões Norte e Nordeste do Brasil (Carvalho & Silva, 2017) e auxiliaram na determinação de áreas aptas e melhores datas de plantio nessas zonas. Dentre as regiões com grande potencial agrícola no país destaca-se o Matopiba.

O acrônimo Matopiba é formado pelas iniciais dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, principais estados produtores do Norte e Nordeste (CONAB, 2013). Matopiba é constituída pelas mesorregiões administrativas do Sul maranhense, Sudoeste piauiense, Oriental do Tocantins e Extremo Oeste baiano. Agrega uma área que produziu 9,4% das 209,5 milhões de toneladas de grãos na safra 2014/2015 (Portal Brasil, 2015), além de oferecer uma dinâmica de crescimento distinta das demais regiões do país (MAPA, 2016b). Os dados municipais do produto interno bruto (PIB) de 2012 (IBGE, 2015) indicaram que alguns municípios pertencentes à região do Matopiba estão entre os melhores classificados do país e se destacam na evolução do agronegócio.

Entretanto, a expansão e intensificação da agricultura são os fatores que mais afetaram o meio ambiente natural nas últimas décadas na região do Matopiba. A expansão da soja representa uma elevada ameaça à biodiversidade no Brasil (Carvalho, 1999; Silva et al., 2010). A rápida expansão agrícola do Norte e Nordeste brasileiro compromete a qualidade ambiental e a disponibilidade dos recursos hídricos. Conforme Cunha et al. (1993), observam-se, em decorrência da atividade agrícola, impactos danosos ao meio ambiente, como a retirada da vegetação nativa de áreas contínuas e extensas; risco à sobrevivência de espécies vegetais e animais com a perda de habitat natural; assoreamento de rios e reservatórios; contaminação das águas superficiais e subterrâneas

por agrotóxicos; alterações no clima local; compactação e impermeabilização dos solos pelo uso intensivo de máquinas agrícolas e o surgimento de áreas em processo de erosão; dentre outros efeitos. Conseqüentemente, são necessários métodos efetivos para compreender os processos do avanço agrícola, os danos e a natureza de seus impactos (Fearnside, 2001).

Diante da elevada relevância econômica, social e ambiental da região do Matopiba, é de sumo interesse analisar dados territoriais e socioeconômicos da região para melhor compreender a dinâmica de evolução, transição e intensificação agrícola (Bolfe et al., 2016). Por isso, há necessidade de estruturar dados territoriais do Matopiba para identificar, delimitar e caracterizar os grandes polos de produção agrícola. Faz-se necessária a compreensão espaço-temporal das expansões agrícolas para subsidiar o planejamento das novas ocupações de terras e gestão dos recursos naturais. As técnicas de sensoriamento remoto e de sistema de informações geográficas permitem o monitoramento da expansão agrícola no Brasil (e.g., Galford et al., 2005; Maire et al., 2014; Muller et al., 2015; Almeida et al., 2016), além de proporcionar análises estatísticas relevantes para o gerenciamento e planejamento dos recursos naturais (Donzeli et al., 1992).

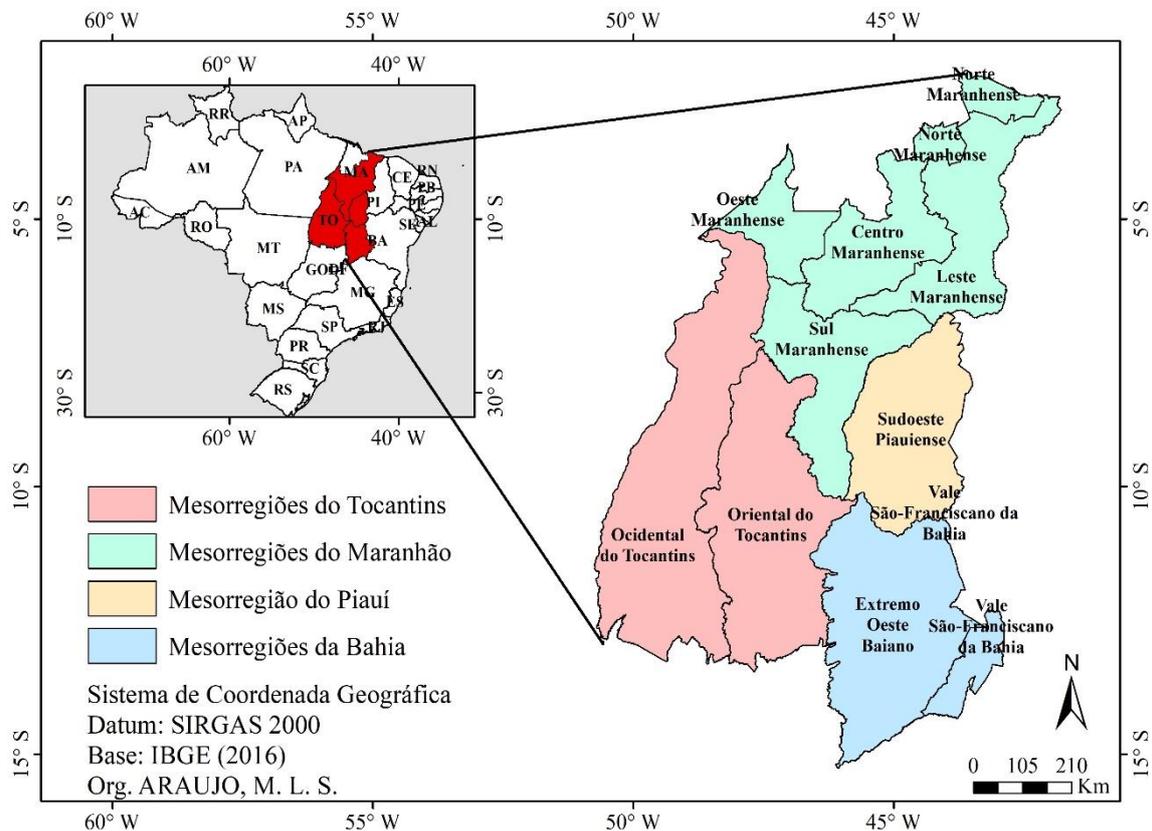
Sendo assim, a observação espacial da dinâmica da produção da soja é de suma relevância para a agricultura brasileira, tornando-se indispensável para traçar mecanismos de intervenções no sistema produtivo da cultura. Apesar do elevado número de trabalhos produzidos na região do Matopiba nos últimos anos, o uso das técnicas de estatística espacial para análises espaciais de culturas agrícolas, como o índice de Moran, ainda não foi explorado pelos autores. Desta forma, ainda permanecem algumas lacunas de conhecimento em escala regional: 1) A produção e produtividade da cultura de soja seguem padrões espaciais que refletem uma aptidão local ou regional? 2) Caso ocorram padrões espaciais de produção e produtividade, os mesmos variam ao longo do tempo demonstrando a migração da aptidão à cultura de soja? 3) Existe uma correlação espacial entre a produção e produtividade da soja? As respostas para esses questionamentos servem de subsídio para elaboração do planejamento agrícola local e regional, além de subsidiar pesquisas e análises na área agrícola, ambiental, logística, hídrica, entre outras.

Portanto, o presente estudo tem como objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal da produção da soja no Matopiba, no período de 1990 a 2015, por meio do uso de técnicas da estatística espacial para séries temporais.

## 4.2 Material e métodos

### 4.2.1 Área de estudo

A região do Matopiba encontra-se localizada no Norte e Nordeste brasileiro, abrange uma área total de 73.284.545 hectares e situa-se entre as coordenadas 2° 30' e 15° 15' de latitude Sul e 42° 00' e 50° 00' de longitude Oeste. A região é constituída por cinco mesorregiões, 15 microrregiões, 135 municípios e 23 milhões de hectares no Maranhão; duas mesorregiões, oito microrregiões, 139 municípios e 27 milhões de hectares no Tocantins; uma mesorregião, quatro microrregiões, 13 municípios e oito milhões de hectares no Piauí; e duas mesorregiões, quatro microrregiões, 30 municípios e 13 milhões de hectares na Bahia (Miranda et al., 2014) (Fig. 4.1).



**Figura 4.1** Mapa de delimitação territorial das mesorregiões pertencentes ao Matopiba, uma subdivisão política dos estados brasileiros que agrega um número variável de municípios envoltentes com alta similaridade em termos de aspectos econômicos, sociais, e principalmente agrícolas. Fonte: IBGE (2016a). Org.: Próprio autor.

A região é coberta pelos biomas Cerrado (91%), Amazônia (7,3%) e Caatinga (1,7%) (IBGE, 2016b) e abrange uma área de grande variabilidade fitofisionômica. O tipo climático predominante na região é o Aw (clima tropical seco), de acordo com a classificação de Köppen (1948), possuindo duas estações climáticas bem definidas: uma seca, de maio a setembro, e outra chuvosa, de outubro a abril (Lumbreras et al., 2015). Com precipitação média anual de 800 mm a 2.000 mm (Assad, 1994).

As principais bacias hidrográficas do Matopiba são o rio Tocantins-Araguaia, o rio Parnaíba, o rio Atlântico Nordeste Ocidental e o rio São Francisco (ANA, 2013). O Latossolo é o tipo de solo predominante na região, com 27,8 milhões de hectares (38% do território) (Magalhães & Miranda, 2014). A região apresenta 13.967.920 ha de áreas legais (19,1% do total da região), sendo estas 46 unidades de conservação (8.334.679 ha), 35 terras indígenas (4.157.189 ha) e 781 assentamentos de reforma agrária e áreas quilombolas (3.033.085 ha) (Miranda et al., 2014a).

#### **4.2.2 Aquisição, espacialização e análise dos dados**

Os dados considerados neste estudo incluíram os censos agrícolas municipais realizados no Brasil, obtidos pela Produção Agrícola Municipal (PAM) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) nos anos de 1990 a 2015. A finalidade desses dados é proporcionar informações estatísticas sobre a produção agrícola em bases anual e municipal para todo o país. Os dados são obtidos mediante aplicação de um questionário em cada município do país, o qual é preenchido por agentes de coleta do IBGE (IBGE, 2018). O questionário é respondido por meio de contatos que os agentes efetuam com técnicos do setor agrícola e produtores.

Para as análises espaço-temporais, foram utilizados dados de produção (toneladas), área plantada (hectares) e área colhida (hectares) da cultura de soja, obtidos por meio da plataforma Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) (IBGE, 2017). A produtividade da soja (toneladas/hectare) foi estimada por meio da relação entre produção e área plantada nos municípios em estudo.

Posteriormente, foram realizadas as análises de estatística descritiva, envolvendo medida de tendência central e de variabilidade de dados, para caracterização da produção e produtividade da cultura de soja na região. Por meio da organização das tabelas dos dados agrícolas municipais, foi possível realizar a espacialização dos mesmos utilizando

técnicas de geoprocessamento para análises temporais, as quais incluíram as análises de agrupamentos dos índices global e local de Moran (Moran, 1948).

### 4.2.3 Estatística espacial para séries temporais

A estatística espacial de agrupamentos identifica a dependência espacial dos dados espaciais, ou seja, se a variação espacial dos dados ocorre de maneira aleatória ou se existe um determinado padrão no decorrer da série temporal. Os agrupamentos espaciais gerados são também conhecidos como aglomerados espaciais globais/locais ou *hotspots* e possibilitam a observação da dinâmica espacial das variáveis em questão.

O índice global de Moran ( $I$ ) mede a autocorrelação espacial entre a vizinhança de uma localidade com base nas funções e nos valores das características das áreas espaciais e testa simultaneamente a hipótese nula de independência espacial entre as localidades, avaliando se o padrão expresso é agrupado, disperso ou aleatório. Os valores positivos (entre 0 e +1) demonstram uma correlação direta e os valores negativos (entre 0 e -1), uma correlação inversa (Câmara et al., 2002). A autocorrelação espacial é computada apenas para os vizinhos de primeira ordem no espaço, conforme estabelecido pelos pesos  $w_{i,j}$  (Anselin, 1995), observados na seguinte equação:

$$I = \frac{n}{S_o} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \rightarrow S_o = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} \quad (1)$$

Em que  $z_i$  é o desvio de um atributo para o recurso  $i$  da sua média;  $z_j$  é o desvio de um atributo para o recurso  $j$  da sua média;  $w_{i,j}$  é o peso atribuído conforme a conexão entre as áreas  $i$  e  $j$ ;  $n$  é o número total de atributos;  $S_o$  é o agregado de todos os pesos espaciais.

O índice local de Moran ( $I_i$ ) trata de um instrumento estatístico para analisar a autocorrelação local entre as diferentes unidades de área, possibilitando uma indicação sobre a significância de um *cluster* de altos ou baixos valores. Os valores significativamente altos e positivos indicam a presença de um *cluster* de valores semelhantes e os valores significativamente baixos indicam desigualdade na região (Zhang & Lin, 2016). O resultado final é expresso por *cluster* do tipo estatisticamente significativo de valores altos (HH), *cluster* de valores baixos (LL), *outlier* em que um alto

valor é cercado principalmente por valores baixos (HL) e *outlier* em que um valor baixo é cercado principalmente por valores altos (LH). O índice local de Moran é definido pela seguinte equação:

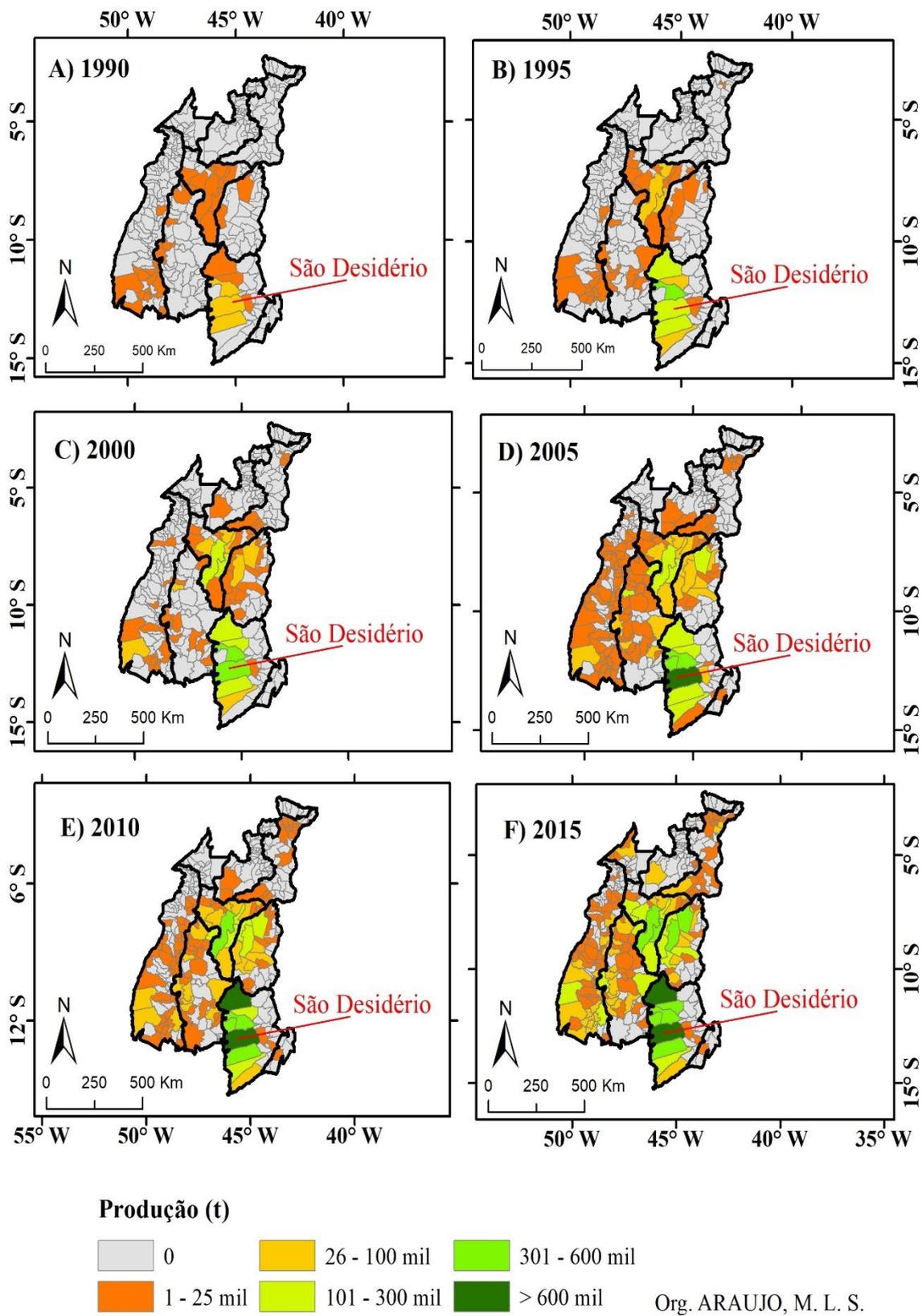
$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j} (x_j - \bar{x}) \rightarrow s_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{x})^2}{n - 1} - \bar{x}^2 \quad (2)$$

Em que  $x_i$  é o valor do atributo considerado na área  $i$ ;  $x_j$  é o valor do atributo considerado na área  $j$ ;  $\bar{x}$  é a média do atributo correspondente;  $w_{i,j}$  é o peso atribuído conforme a conexão entre as áreas  $i$  e  $j$ ; e  $n$  é número total de atributos.

### 4.3 Resultados

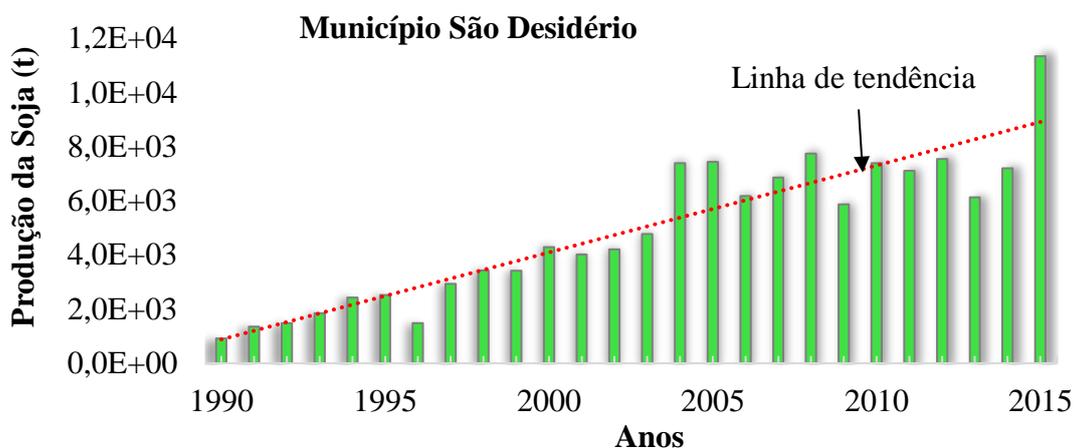
#### 4.3.1 Dinâmica espaço-temporal da produção e produtividade da soja

A região do Matopiba apresentou um crescimento expressivo na produção da cultura de soja durante a série temporal (1990 a 2015) (Fig. 4.2), com uma produção municipal máxima de 91.999 toneladas em 1990 e de 1.134.000 toneladas em 2015, ambas observadas no município de São Desidério, localizado na mesorregião Extremo Oeste baiano. As somas anuais da produção da soja em todos os municípios que formam a região resultaram em uma produção de 260.624 toneladas em 1990 a 10.758.927 toneladas em 2015, ou seja, no intervalo de 25 anos a região do Matopiba apresentou uma taxa de crescimento de 4.028%.



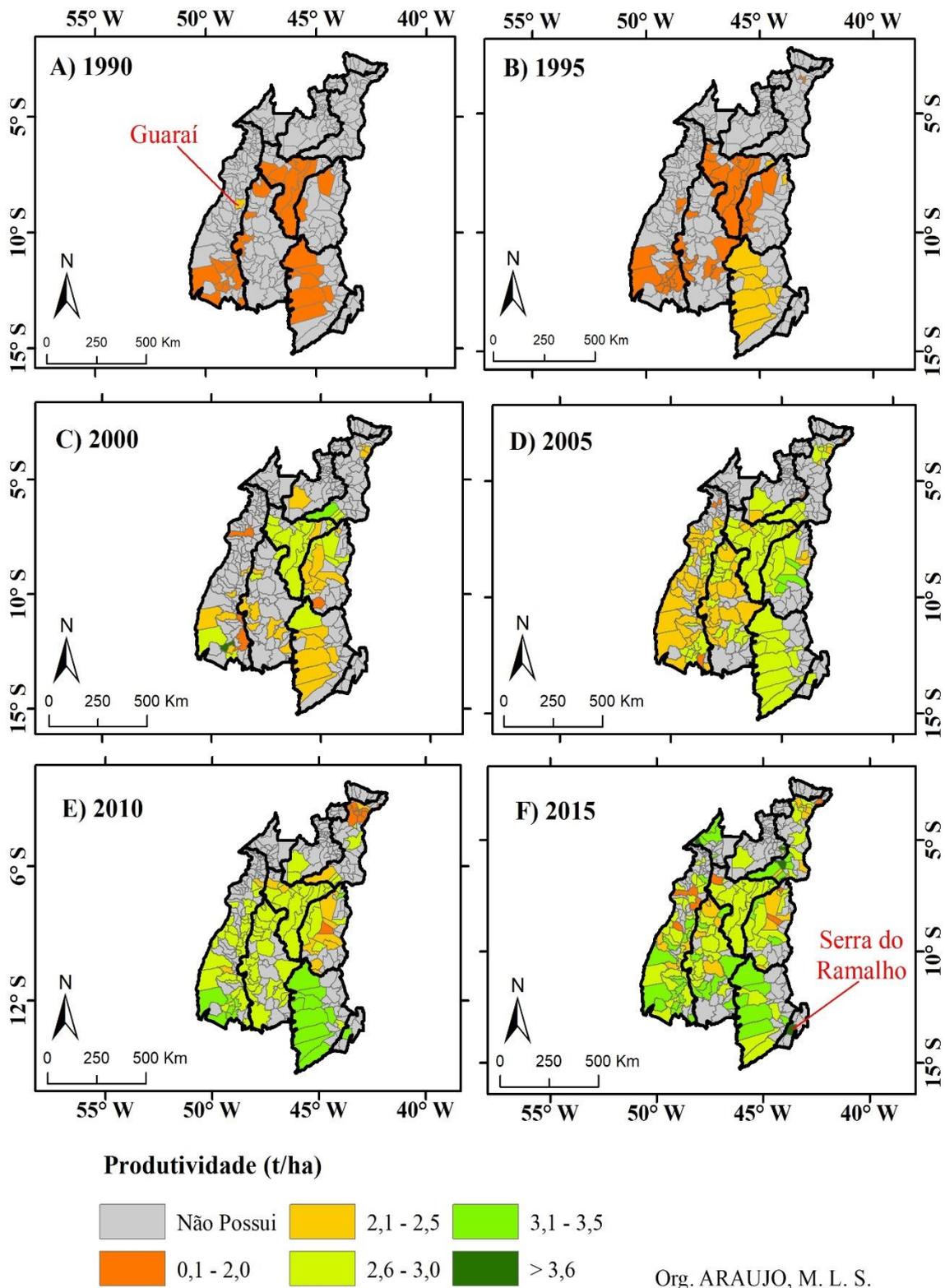
**Figura 4.2** Dinâmica espaço-temporal da produção de soja no Matopiba, baseado em dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE para os anos de 1990 (A), 1995 (B), 2000 (C), 2005 (D), 2010 (E) e 2015 (F).

No início da série temporal, a maior produção da soja esteve concentrada na mesorregião do Extremo Oeste baiano, com destaque para o município de São Desidério. Posteriormente, notou-se uma expansão da produção no sentido de sul para o norte, envolvendo os municípios do Extremo Oeste baiano e os municípios das mesorregiões Sul maranhense e Sudoeste piauiense. O município de São Desidério apresentou um crescimento linear na produção da soja no decorrer da série temporal (Fig. 4.3). O mesmo possui a segunda maior extensão territorial da Bahia, com aproximadamente 15.116 km<sup>2</sup> (IBGE, 2016c), e está na liderança dos municípios com maior produção agrícola do país.



**Figura 4.3** Evolução da produção agrícola municipal da cultura de soja no município de São Desidério-BA (1990 a 2015).

Inicialmente, a produtividade da cultura de soja na área de estudo apresentou destaque no município de Guaraí, Tocantins (Fig. 4.4). Além das mesorregiões do Extremo Oeste baiano, Sudoeste tocantinense e região central do Matopiba. No final da série temporal, a produtividade expandiu-se em diferentes regiões do Matopiba, em destaque o Extremo Oeste baiano e o Sudoeste tocantinense. Em 1990, a produtividade máxima da soja na região era de 2,1 t ha<sup>-1</sup> no município de Guaraí. Em 2015, a produtividade máxima foi de 4 t ha<sup>-1</sup> no município de Serra do Ramalho, Bahia. Em destaque, a região do Oeste maranhense, área de transição Amazônia-Cerrado, que apresenta elevada produtividade da cultura de soja no final da série temporal.



**Figura 4.4** Dinâmica espaço-temporal da produtividade da cultura de soja, baseado em dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE para os anos de 1990 (A), 1995 (B), 2000 (C), 2005 (D), 2010 (E) e 2015 (F).

### 4.3.2 Estatística espacial

O índice global de Moran aplicado nas variáveis de produção, produtividade, área plantada e área colhida da soja demonstrou a existência de padrões espaciais entre os municípios pertencentes à área de estudo (Tabela 4.1). Os resultados do índice global de Moran foram maiores que zero, indicando uma autocorrelação espacial. Os valores de  $p$  foram inferiores a 0,01 em toda a série temporal, indicando significância estatística para autocorrelação espacial. A confiabilidade de 99% demonstra a tendência de formar *clusters* entre os municípios.

**Tabela 4.1** Índice global de Moran para as variáveis de quantidade produzida, produtividade, área plantada e área colhida, considerando-se os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 e 2015.

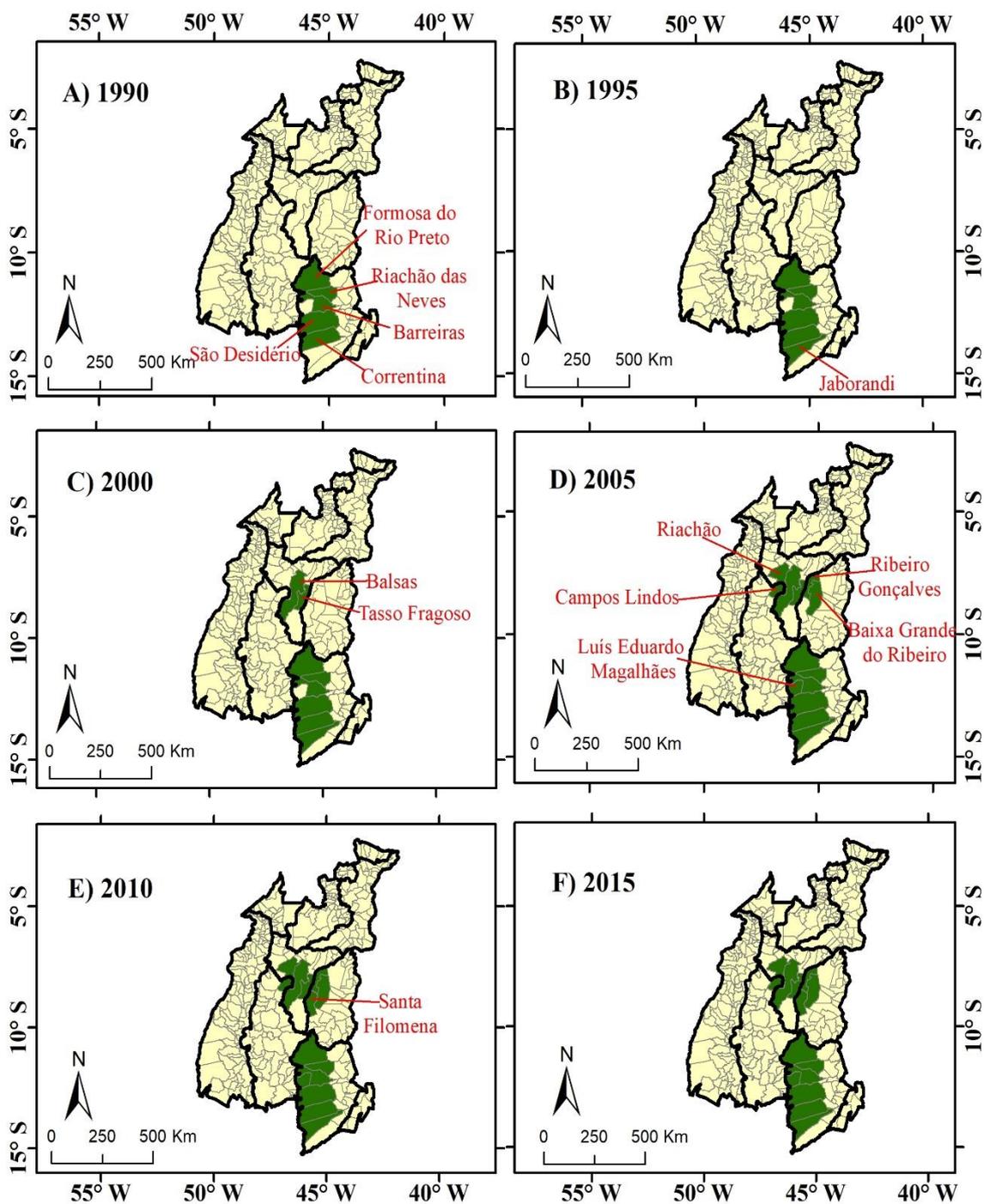
Período	Índice de Moran	z-Score	Valor-p	Resultado
Produção (t)				
1990	0.073	4.396	<0.01	Agrupado
1995	0.076	4.382	<0.01	Agrupado
2000	0.082	4.680	<0.01	Agrupado
2005	0.132	6.752	<0.01	Agrupado
2010	0.105	5.366	<0.01	Agrupado
2015	0.129	6.373	<0.01	Agrupado
Produtividade (t/ha)				
1990	0.072	3.506	<0.1	Agrupado
1995	0.190	8.601	0	Agrupado
2000	0.188	8.516	0	Agrupado
2005	0.444	19.794	0	Agrupado
2010	0.428	19.088	0	Agrupado
2015	0.389	17.363	0	Agrupado
Área Plantada (ha)				
1990	0.074	4.48	<0.01	Agrupado
1995	0.078	4.447	<0.01	Agrupado
2000	0.081	4.665	<0.01	Agrupado
2005	0.132	6.764	0	Agrupado
2010	0.109	5.521	0	Agrupado
2015	0.135	6.608	0	Agrupado
Área Colhida (ha)				
1990	0.074	4.474	<0.01	Agrupado
1995	0.078	4.447	<0.01	Agrupado
2000	0.081	4.665	<0.01	Agrupado

2005	0.132	6.764	0	Agrupado
2010	0.109	5.520	0	Agrupado
2015	0.135	6.606	0	Agrupado

#### 4.3.4 Estatística espacial aplicada à produção e produtividade da soja

Com base nos resultados do índice global de Moran, foi conduzida ainda a análise do índice local de Moran para identificar espacialmente as zonas agrícolas de produção e produtividade que foram consolidadas no decorrer do tempo. Os resultados são apresentados em quatro tipos (Figs. 4.5 e 4.6): HH, indicando maior produção/produtividade no município em questão e municípios vizinhos (áreas verde-escuras); HL, indicando alta produção/produtividade no município em questão e baixa produção/produtividade nos municípios vizinhos (áreas verde-claras); LL, indicando menor produção/produtividade no município em questão e nos municípios circunvizinhos (áreas roxas); e LH, indicando baixa produção/produtividade no município em questão e alta produção/produtividade nos municípios circundantes (áreas lilás).

O índice local de Moran para a produção da soja apresentou *clusters* com valores altos, positivos e estatisticamente significativos durante a série temporal (Fig. 4.5). O mesmo apresentou uma autocorrelação do tipo HH, com uma consolidação e expansão no decorrer do tempo. No ano de 1990, o *cluster* HH da produção da cultura foi formado na mesorregião do Extremo Oeste baiano, nos municípios de Barreiras, Correntina, Formosa do Rio Preto, Riachão das Neves e São Desidério. O índice local de Moran mais elevado foi observado no município de São Desidério, o que significa uma alta probabilidade do mesmo ter influenciado os demais municípios para a consolidação da produção da soja. O *cluster* localizado no Extremo Oeste baiano manteve-se autocorrelacionado positivamente no decorrer do tempo com os municípios citados. Em 1995, o município Jaborandi integrou-se ao *cluster* HH formado no Extremo Oeste baiano. Em 2005, incorporou-se o município Luís Eduardo Magalhães ao *cluster* no Extremo Oeste baiano. A partir de 2000, o *cluster* expandiu-se em direção norte, na porção sul da mesorregião Sul Maranhense.



**Índice local de Moran: Produção de Soja**

Org. ARAUJO, M. L. S.

■ Não Significativo ■ HH Cluster

**Figura 4.5** Dinâmica espaço-temporal do índice local de Moran aplicado à produção da cultura de soja na área de estudo para os anos de 1990 (A), 1995 (B), 2000 (C), 2005 (D), 2010 (E) e 2015 (F).

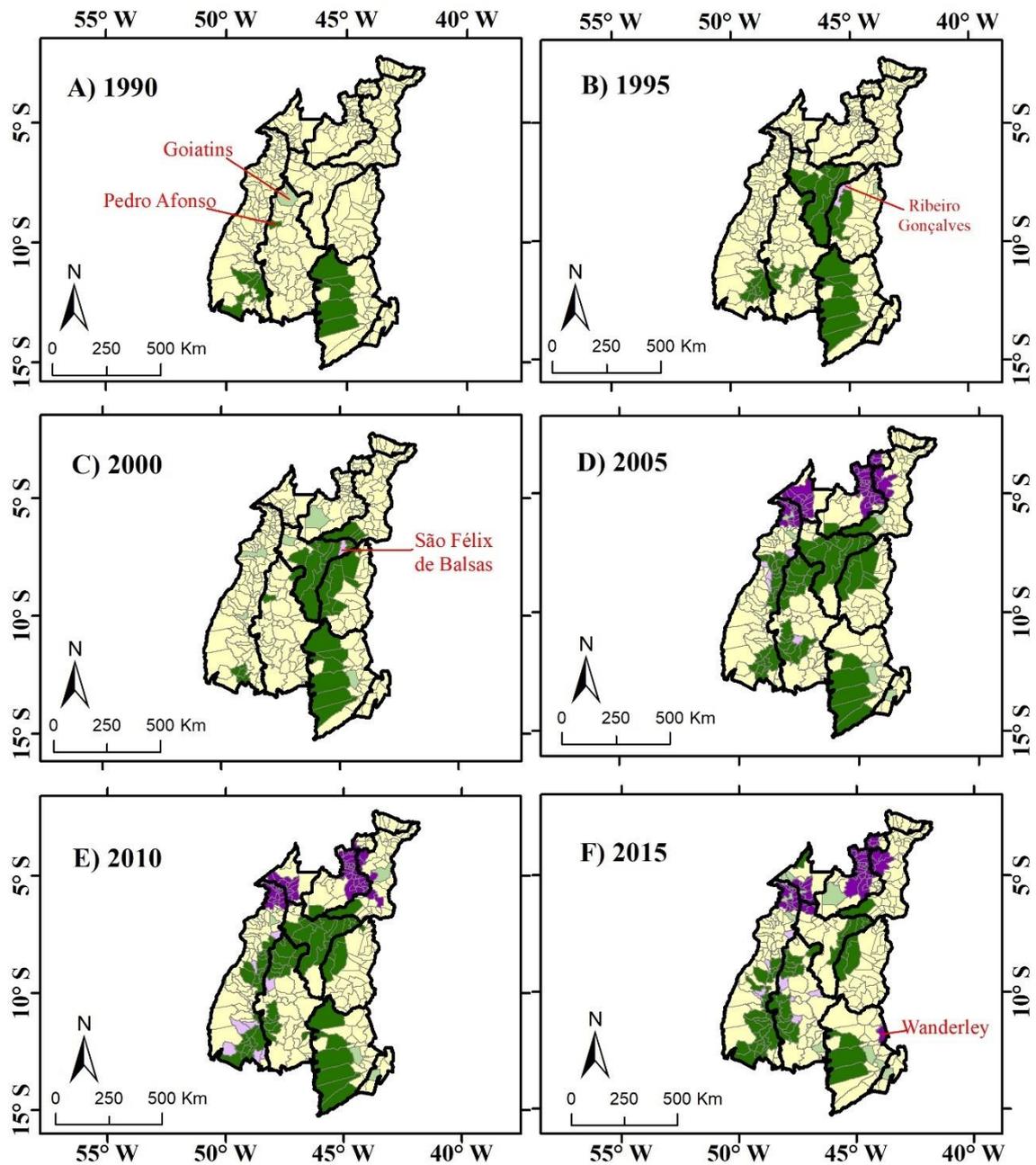
Em 2000, além do *cluster* de autocorrelação positiva localizada no Extremo Oeste baiano, ocorreu a formação de mais uma zona estatisticamente produtiva do tipo HH. A mesma foi localizada na mesorregião Sul maranhense e foi constituída pelos municípios de Balsas e Tasso Fragoso. Em 2005, integrou-se ao *cluster* central do Matopiba, o município maranhense de Riachão, além do município de Campos Lindos, no Tocantins, e dos municípios de Ribeiro Gonçalves e Baixa Grande do Ribeiro, do Piauí. Em 2010, com a integração ao mesmo do município de Santa Filomena, no Piauí, notou-se a consolidação da zona central de produção da soja na região do Matopiba com os municípios citados, mantendo-se no ano de 2015.

Dessa forma, por meio do índice local de Moran apresentado no final da série temporal estudada, notou-se a presença e consolidação de duas zonas de alta produção da soja na região do Matopiba. As mesmas são formadas por municípios que possuem uma alta produção da cultura, circunvizinhos de municípios que também possuem uma alta produção. Essas duas zonas produtivas são formadas por municípios do Extremo Oeste baiano, do Sul maranhense, do Sudoeste piauiense e um município do Tocantins. O principal responsável pela descontinuidade geográfica entre essas duas áreas é a presença do Parque Estadual do Jalapão e do Parque Nacional Nascentes do Parnaíba. Esse resultado indica que a produção da cultura de soja na região do Matopiba não ocorre de forma aleatória, pois a mesma integra padrões espaciais constituídos no decorrer da série temporal, além de confirmar estatisticamente a presença de expansão sul-norte na produção da soja na região.

O índice local de Moran para a variável de produtividade da soja na região do Matopiba apresentou *clusters* estatisticamente significativos do tipo HH, HL, LL e LH durante a série temporal estudada (Fig. 4.6). Em 1990, o índice local de Moran indicou a presença de duas zonas de alta produção, circunvizinhas de municípios que também possuem alta produção (índice de Moran do tipo HH). As mesmas foram concentradas no Extremo Oeste baiano (constituídos pelos municípios Formosa do Rio Preto, Riachão das Neves, Barreiras, São Desidério e Correntina) e no Sudoeste tocantinense (formados pelos municípios Dueré, Aliança do Tocantins, Gurupi, Peixe, Figueirópolis e Araguaçu), além do município de Pedro Afonso, localizado na parte central do Tocantins, que também apresentou uma autocorrelação do tipo HH.

Nesse mesmo ano de 1990, o município de Goiatins, no estado do Tocantins, destacou-se por apresentar uma alta produtividade da soja em meio a municípios vizinhos com produtividade baixa (índice de Moran do tipo HL). Porém, no ano de 1995, foi

possível notar que os municípios de Pedro Afonso e Goiatins não conseguiram manter-se como uma alta potência de produtividade da soja. Este resultado indica e evidencia estatisticamente que a interação agrícola entre municípios vizinhos, principalmente em políticas públicas, são extremamente relevantes para a expansão da agricultura no Matopiba.



**Índice local de Moran: Produtividade de Soja**

Org. ARAUJO, M. L. S.



**Figura 4.6** Dinâmica espaço-temporal do índice local de Moran aplicado à produtividade da cultura de soja na área de estudo para os anos de 1990 (A), 1995 (B), 2000 (C), 2005 (D), 2010 (E) e 2015 (F).

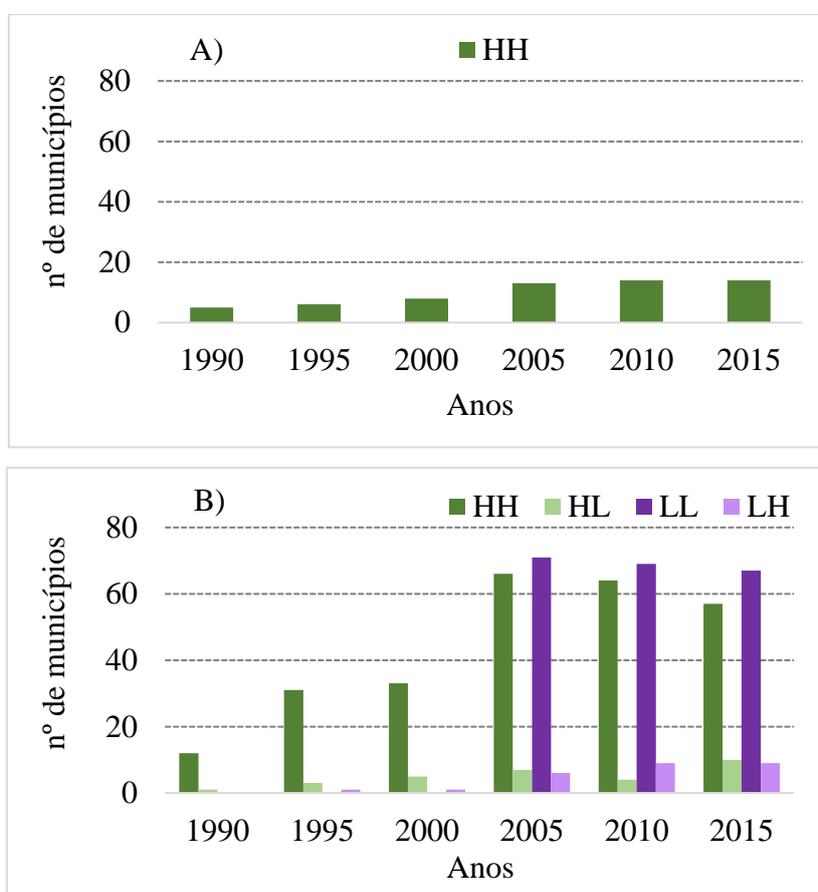
No ano de 1995, foram formados três *clusters* do tipo HH na região do Matopiba, indicando áreas altamente significativas de produtividade da soja. As mesmas foram localizadas no Extremo Oeste baiano, no Centro-Sul tocantinense e no centro do Matopiba. No mesmo ano, o município Ribeiro Gonçalves, localizado no Sudoeste piauiense, apresentou uma autocorrelação de produtividade baixa com municípios vizinhos de produtividade alta (índice Moran do tipo LH). Esse mesmo município, em 2000, apresentou uma autocorrelação do tipo HH, ou seja, houve um aumento na produtividade nesse município. O mesmo comportamento foi observado no município maranhense de São Félix de Balsas, em 2000. Este resultado confirma a importância da relação agrícola entre municípios vizinhos para o crescimento da agricultura. Em 2000, a autocorrelação espacial dos municípios ficou concentrada nas regiões do Extremo Oeste baiano, Sul maranhense e Sudoeste piauiense, com *clusters* do tipo HH.

Nos anos 2005, 2010 e 2015, foram observados dois *clusters* de municípios com baixa produtividade estatisticamente significativos, em meio a municípios com baixa produtividade (LL). Esses *clusters* foram constituídos por municípios do Centro maranhense, Leste maranhense, Oeste maranhense e Norte do Tocantins. Em 2015, esse comportamento também foi observado no município de Wanderley, localizado na Bahia. Este resultado indica um alerta para essas regiões, pois no decorrer dos próximos anos, o fator que leva o crescimento de áreas de baixa produtividade, circunvizinha de municípios de baixa produtividade, pode culminar zonas maiores de áreas com baixo rendimento. Além dos *clusters* do tipo LL, também foram observados *clusters* do tipo HH, HL e LH nos últimos anos da série temporal.

De forma geral, os municípios na região do Matopiba apresentaram um acréscimo positivo e significativo nos padrões espaciais da produtividade da soja. Esse comportamento foi observado até o ano de 2005. Nos anos seguintes da série temporal, houve um decréscimo nas autocorrelações espaciais positivas, ou seja, a produtividade da soja mostrou-se mais dispersa entre os municípios da região do Matopiba. No final da série temporal, houve um acréscimo das áreas com padrões espaciais de baixa produtividade. Este resultado determina zonas municipais que necessitam de observações

agrícolas, sociais, ambientais e econômicas antes de investimentos na agricultura municipal desta região.

Com base nos dados do índice local de Moran aplicado nas variáveis de produção e produtividade nos anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 e 2015 (Fig. 4.7), é possível notar que a produção e a produtividade da soja não possuem uma correlação espacial entre si ao longo do tempo na região do Matopiba. A produção da soja apresenta uma menor quantidade de agrupamentos espaciais em comparação com a produtividade da soja. Este resultado indica que os municípios que produzem mais não são necessariamente os municípios que possuem maiores áreas para o cultivo.



**Figura 4.7** Números de municípios com agrupamentos espaciais de produção (A) e produtividade (B) da soja no Matopiba do tipo HH, HL, LL e LH (1990 a 2015).

A produção da soja apresentou uma variação de cinco a 14 municípios com alta produção da soja, circunvizinhos com municípios de alta produção da cultura. Este resultado indica que, apesar da grande extensão territorial da região do Matopiba e sua grande importância para a agricultura brasileira, as zonas produtivas são concentradas em

poucos municípios. Esta concentração se manteve constante no final da série temporal, no qual, no intervalo de cinco anos (2010 a 2015), somente 14 municípios mostraram-se pertencentes às maiores zonas produtivas da região. Em 1990, os municípios de alta produção, circunvizinhos a municípios de alta produção, representou 83,92% da produção total (260.624 ton.) de soja na região do Matopiba. Em 2015, a produção dos municípios com índice de Moran HH representou 61,22% da produção total (10.758.927 ton.) de soja na região.

A produtividade da soja apresentou os quatro tipos de agrupamentos espaciais (HH, HL, LL e LH) com uma variação de um a 71 municípios no decorrer da série temporal (1990 a 2015). Esse resultado confirma o elevado número de agrupamentos municipais que possuem grandes áreas de terras plantadas com soja. Importante destacar que as zonas com baixa produtividade da soja, vizinhos de municípios de baixa produtividade da cultura, estão em crescimento na região do Matopiba, e agregam mais municípios que as regiões de alta produtividade, circunvizinhos de alta produtividade.

#### **4.4 Discussão**

Para as tomadas de decisões dos planejamentos e desenvolvimentos agrícolas regionais, é essencial o conhecimento dos padrões espaço-temporais das culturas e do seu desempenho ao longo do tempo. A observação de zonas produtivas e de dinâmicas agrícolas em uma determinada região é um fator chave para estimular o desenvolvimento da mesma e gerar rendimentos crescentes (Porter, 1996). Por isso, as análises realizadas neste estudo, evidenciando os padrões espaciais da cultura de soja na região do Matopiba no decorrer de 25 anos, podem fornecer importantes subsídios para o desenvolvimento da agricultura na região, principalmente para o desenvolvimento ambientalmente sustentável.

As técnicas da estatística espacial servem de subsídio em diversas pesquisas agrícolas (Cho & Newman, 2005; Yu et al., 2014; Donfouet et al., 2017). O uso dos índices global e local de Moran são muito utilizados na literatura e mostram ser eficientes na observação dos agrupamentos espaciais formados ao longo de uma série temporal. Esses índices são ferramentas-chave em estudos ambientais e agrícolas e foram utilizados, por exemplo, por Javari (2017), Clemente et al. (2017) e Yuan et al. (2017).

Os resultados das autocorrelações espaciais globais aplicadas nas variáveis de produção, produtividade, área plantada e área colhida da cultura de soja na área de estudo

evidenciaram uma autocorrelação positiva entre as localidades e uma tendência das mesmas formarem zonas produtoras de soja. Esse resultado demonstra a expansão e a concretização da cultura no Matopiba no decorrer do tempo e uma tendência da mesma em crescer e fortalecer a produção na região do Matopiba.

Nos últimos anos, a região do Matopiba é considerada a grande fronteira para o investimento do agronegócio (Anderson et al., 2016). Trata-se de um processo de expansão agrícola aliado a atributos econômicos, políticos e sociais positivos e favoráveis que ocorrem nessa região. Conforme Bolfe et al. (2016), as condições edafoclimáticas apropriadas, as políticas públicas, as inovações tecnológicas e o empreendedorismo dos agricultores edificam o Brasil na liderança agrícola tropical. De acordo com Espíndola e Cunha (2015), diversos incentivos econômicos e políticos para a produção agrícola são realizados nas regiões brasileiras Centro-Oeste e Nordeste. Por exemplo, segundo o Plano Agrícola e Pecuário 2016-2017 (MAPA, 2016c), foram disponibilizados para os produtores rurais e suas cooperativas, um total de R\$ 183,8 bilhões para o financiamento de suas atividades na safra 2016/2017, como forma de créditos custeio, de investimento, de comercialização e de industrialização.

Além disso, ciente dos riscos e das vulnerabilidades no setor agropecuário, principalmente provenientes de fenômenos climáticos adversos, o governo federal tem investido tecnicamente e financeiramente para que esses riscos sejam reduzidos e dirigidos com uma maior eficiência. Como exemplo, o investimento técnico realizado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) na realização do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), oferecendo dados climáticos associados às exigências das plantas e características dos solos. Atualmente, o ZARC é o principal suporte à gestão de riscos climáticos do Brasil, além do investimento financeiro oferecido pelo Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro Rural (PSR), instituído pela Lei Federal no. 10.823 de 19 de dezembro de 2003 e pelo Decreto Federal no. 5.121 de 30 de junho de 2004 que objetivaram apoiar a expansão das áreas agrícolas cobertas com o seguro rural no país.

Por meio do índice local de Moran, foi possível observar que a estrutura espacial da autocorrelação da produção da soja entre os municípios pertencentes ao Matopiba consolidou-se em destaque na Bahia. O Extremo Oeste baiano apresentou, em toda a série temporal analisada (1990 a 2015), *clusters* de valores altos (HH) e *hotspots* estatisticamente significativos. A partir do ano 2000, o Sul maranhense apresentou uma autocorrelação alta e estatisticamente significativa; a partir de 2005, esse comportamento

também ocorreu no Sudoeste piauiense. Em outras palavras, a estatística de autocorrelação demonstrou a relação espacial entre as localidades do Extremo Oeste baiano, do Sul maranhense e do Sudoeste piauiense e a influência espacial que o Extremo Oeste baiano ocasionou nas demais regiões citadas.

Conforme Spagnolo (2011), a expansão agrícola da soja no Extremo Oeste da Bahia obteve maior consolidação a partir do ano de 2000, com incentivos oferecidos pelo governo federal em programas para aumentar a produção agrícola do Estado, como exemplo, o Programa de Investimento para Modernização da Agricultura Baiana (AGRINVEST). No Maranhão, o maior incentivo ocorreu pela melhoria da infraestrutura de rodoviárias do estado (Frota & Campelo, 1999; Studte, 2008), pela valorização dos preços da soja nos mercados internacionais e os incentivos creditícios (Mesquita, 2011), além dos investimentos tecnológicos, com a transformação da estrutura agrária tradicional de subsistência em uma estrutura agrária tecnificada (Paludzyszyn Filho, 1995; Bolfe et al., 2016).

Mediante o resultado do índice local de Moran para a variável da produtividade da cultura de soja na região do Matopiba, observou-se que a soja é produzida em áreas com padrões espaciais definidos. De acordo com os padrões espaciais observados, é importante destacar as zonas de baixa produtividade, circunvizinhos de municípios que também possuem baixa produtividade. As mesmas são áreas que precisam de apoio de políticas públicas e incentivos financeiros para elevar sua produção. Essas áreas foram observadas no Centro-Leste maranhense, Oeste maranhense e Norte do Tocantins de 2005 a 2015. Em 2015, esse comportamento também foi observado no município baiano de Wanderley.

As zonas de baixa produtividade, com municípios vizinhos igualmente de baixa produtividade, tenderam a se localizarem áreas de transição entre biomas. A região do Centro-Leste maranhense, Oeste maranhense e Norte do Tocantins está localizada na região de transição Amazônia-Cerrado; e o município de Wanderley está localizado na região de transição Cerrado-Caatinga. Segundo Silva et al. (2016), uma área de transição entre diferentes biomas apresenta uma alta diversidade de ecossistemas, biodiversidade e condições climáticas, além de apresentarem áreas com menor fertilidade natural e serem mais vulneráveis às alterações climáticas. Por isso, indica-se que as zonas de baixa produtividade apresentadas neste estudo realizem observações sociais, ambientais, econômicas e agrícolas para futuramente continuarem com a expansão da agricultura na região de forma sustentável.

Por meio do resultado do índice local de Moran também foi possível notar que as zonas produtivas estão concentradas em poucas regiões do Matopiba. Esse fato pode estar relacionado com a discussão realizada por Figueiredo (2016), no qual relata os desafios da Embrapa. Essa instituição governamental não foi criada para competir com instituições privadas, porém, observa-se um crescimento das pesquisas privadas e uma maior distribuição de novas cultivares com capacidades inovadoras por parte das mesmas. Por isso, a maior parte das pesquisas é retida em zonas produtivas. O resultado desse processo é a concentração regional da produção da soja em zonas que detém maior aporte tecnológico para investimentos em pesquisas *in situ*, principalmente na realização de testes de cultivares adaptáveis às condições climáticas desta região.

#### **4.5 Conclusões**

Neste estudo, importantes zonas produtivas de soja na região do Matopiba puderam ser identificadas com as análises da estatística espacial dos índices global e local de Moran. As zonas mais produtivas da cultura de soja estão localizadas na região do Extremo Oeste baiano, Sul maranhense e Sudoeste piauiense. As zonas de elevada produtividade de soja estão em decréscimo na região do Matopiba, localizadas no Extremo Oeste baiano, Sul tocaninense e Sudeste maranhense. As zonas de baixa produtividade da soja estão posicionadas no Centro-Leste maranhense, Oeste maranhense e no norte do Tocantins, além do município baiano de Wanderley; localizados em área de transição entre biomas.

Com base nessa análise espaço-temporal, foi possível responder os seguintes questionamentos: 1) A produção e a produtividade da cultura soja no Matopiba seguem padrões espaciais que refletem uma aptidão local ou regional? A resposta foi positiva. 2) Caso ocorram padrões espaciais de produção e produtividade, os mesmos variam ao longo do tempo demonstrando a migração da aptidão à cultura da soja? Resposta positiva também, pois a migração da cultura de soja na região do Matopiba ocorre principalmente devido às políticas públicas e aos investimentos tecnológicos. 3) Existe uma correlação espacial entre a produção e produtividade da soja? Resposta negativa, a produção e a produtividade da soja não apresentaram correlação espacial, principalmente pela elevada diferença entre as quantidades de municípios pertencentes aos padrões espaciais formados. De forma geral, os resultados das análises produzidas neste estudo servem de

subsídio para os planejamentos agrícolas local e regional no Matopiba, além de embasar outras análises nas áreas agrícola, ambiental, logística e hídrica na região.

Diante do cenário de elevada expansão agrícola para o cultivo da soja na região do Matopiba, esse estudo objetivou estimar a dinâmica espaço-temporal da cultura de soja com base na técnica de estatística espacial de áreas, a partir dos dados agrícolas municipais. A hipótese formulada foi a de que a dinâmica da produção e produtividade da cultura de soja seguem padrões espaciais que variam ao longo do tempo e auxiliam na avaliação da migração da aptidão à cultura da soja entre os municípios na área de estudo.

Os resultados obtidos permitiram concluir que a produção, produtividade, área plantada e área colhida da cultura de soja seguem padrões espaciais entre os municípios que constituem a região do Matopiba, possibilitando a análise do comportamento de migração da cultura de soja, o qual é essencial para o desenvolvimento agrícola da região. Assim, pode-se afirmar que todos os objetivos específicos propostos nesta pesquisa foram alcançados e a hipótese testada foi aceita.

Ao longo dos anos, a produção e produtividade da soja apresentaram um elevado crescimento na região do Matopiba. Porém, a mesma possui grande dependência das políticas públicas e dos investimentos tecnológicos formulados para a região. Por meio dos agrupamentos espaciais formados no decorrer da série temporal, foi possível notar a consolidação da produção no Extremo Oeste baiano, no Sul maranhense e no Sudoeste piauiense, demonstrando grande concentração da produção da soja em apenas 14 dos 337 municípios que constituem o Matopiba. Foi possível ainda notar um elevado número de municípios que integram o grupo de municípios com baixa produtividade da cultura de soja na região do Matopiba. Portanto, diante de uma região com elevado potencial agrícola, recomenda-se a realização de planejamentos agrícolas regionais com o objetivo de reverter os agrupamentos espaciais de baixa produtividade, como também alavancar o número de municípios com elevada produção de soja no Matopiba.

Estudos posteriores devem ser realizados com o intuito de analisar a correlação espacial entre as variáveis de políticas públicas e investimentos tecnológicos sobre a dinâmica espaço-temporal da cultura de soja no Matopiba. Com isso, será possível determinar a variável necessária para impulsionar a expansão agrícola da soja em determinado município da área de estudo. Faz-se necessário também analisar as variáveis ambientais no Matopiba para observar espaço-temporalmente os impactos da expansão

agrícola nos recursos naturais, tais como a erosão, poluição hídrica e poluição atmosférica. Para tais estudos posteriores, as ferramentas das geotecnologias e as técnicas da estatística espacial de áreas são essenciais para auxiliar as análises a serem realizadas. Sugere-se ainda replicar a análise aqui desenvolvida para outras áreas dentro do Cerrado e da Amazônia, e também em outros biomas, particularmente naqueles de marcante sazonalidade climática como a Caatinga e o Pantanal.

## Referências

Agrosatélite. 2015. **Geospatial Analyses of the Annual Crops Dynamic in the Brazilian Cerrado Biome: 2000 to 2014**. Rudorff, B.; Risso, J. et al. Florianópolis: Santa Catarina, 28 p.

Ahmadi, M.; Jorfi, S.; Azarmansuri, A.; Jaafarzadeh, N.; Mahvi, A. H.; Soltani, A. H.; Cheshmeh, R. D.; Akbari, H.; Akhbarizadeh, R. 2017. Zoning of heavy metal concentrations including Cd, Pb and As in agricultural soils of Aghili plain, Khuzestan province, Iran. **Data in Brief**, v. 14, p. 20-27.

Allen, R. G.; Pereira; L. S.; Raes, D.; Smith. M. 1998. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma, Itália: FAO. Irrigation and Drainage Paper, v. 56, 297 p.

Almeida, C. A.; Coutinho, A. C.; Esquerdo, J. C. D. M.; Adami, M.; Venturieri, A.; Diniz, C. G.; Dessay, N.; Durieux, L.; Gomes, A. R. 2016. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 3, p. 291-302.

Almeida, E. 2012. **Econometria Espacial Aplicada**. Campinas: Editora Alínea, 498 p.

Alvarez Filho, A. 1988. Botânica e desenvolvimento. In: Satos, O. S. (coord.) **A cultura da soja – 1**. Rio de Janeiro: Globo, p. 27-35.

An, K.; Ouyang, Y. 2016. Robust grain supply chain design considering post-harvest loss and harvest timing equilibrium. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 88, p. 110-128.

ANA. Agência Nacional de Águas. 2003. **Regiões hidrográficas**. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?id=92&currTab=distribution>> Acesso em: 22 jan. 2017.

ANA. Agência Nacional de Águas. 2013. **Bacias hidrográficas**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/default.aspx>> Acesso em: 22 jan. 2017.

Andersen, L. E.; Granger, C. W. J.; Reis, E. J.; Weinhold, D.; Wunder, S. 2002. **The dynamics of deforestation and economic growth in the Brazilian Amazon**. Cambridge: Cambridge University Press.

Anderson, M. C.; Zolin, C. A.; Sentelhas, P. C.; Hain, C. R.; Semmens, K.; Yilmaz, M. T.; Gao, F.; Otkin, J. A.; Tetrault, R. 2016. The evaporative stress index as an indicator of agricultural drought in Brazil: an assessment based on crop yield impacts. **Remote Sensing of Environment**, v. 174, p. 82-99.

Andrade, R. G.; Bolfe, E. L.; Victoria, D. C.; Nogueira, S. F. 2017. Avaliação das condições de pastagens no Cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 7, n. 1, p. 34-41.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2016. **Boletim Mensal do Biodiesel - Dezembro de 2016**. Disponível em: <[http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/boletins-anp/Boletim\\_Mensal\\_do\\_Biodiesel/2016/Boletim\\_Biodiesel\\_DEZEMBRO\\_2016.pdf](http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/boletins-anp/Boletim_Mensal_do_Biodiesel/2016/Boletim_Biodiesel_DEZEMBRO_2016.pdf)> Acesso em: 22 out. 2017.

Anselin, L. 1992. **SpaceStat tutorial: a workbook for using SpaceStat in the analysis of spatial data**. Mimeo, University of Illinois.

Anselin, L. 1995. Local indicators of spatial association - LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 2, p. 93-115.

Anselin, L. 2005. **Exploring Spatial Data with GeoDa: a Workbook**. Illinois: Urbana-Champaign, 244 p.

Arantes, N. E.; Souza, P. I. M. 1993. **Cultura da soja nos Cerrados**. Piracicaba: Potáfos, 535 p.

Assad, E. D. (Coord.). 1994. **Chuva nos Cerrados: análise e espacialização**. Brasília: Embrapa-SPI, 423 p.

Assunção, J.; Gandour, C. C.; Rocha, R. 2012. Deforestation slowdown in the legal Amazon: prices or policies? **Climate Policy Initiative**, p. 1-31.

Bolfe, E.; Victória, D.; Contini, E.; Bayma-Silva, G.; Spinelli-Araújo, L.; Gomes, D. 2016. MATOPIBA em crescimento agrícola: aspectos territoriais e socioeconômicos. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 4, p. 38-62.

Bonato, E. R.; Bertagnolli, P. F.; Ignaczak, J. C.; Tragnago, J. L.; Rubin, S. A. L. 1988. Desempenho de cultivares de soja em três épocas de semeadura, no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 6, p. 879-884.

Boneti, L. P. 1981. Distribuição da soja no mundo. In: Miyasaka, S.; Medina, J. C. **A soja no Brasil**. Campinas: ITAL, p. 1-6.

Brown, J. C.; Koeppe, M.; Coles, B.; Price, K. P. 2005. Soybean production and conversion of tropical forest in the Brazilian Amazon: the case of Vilhena, Rondônia. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, v. 34, p. 462-469.

Burrough, P. A. 1986. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Nova York: Oxford Clarendon Press, 193 p.

Burrough, P. A.; McDonnell, R. A.; Lloyd, C. D. 2015. **Principles of geographical information systems**. Nova York: Oxford Clarendon Press, 3<sup>a</sup> ed., 432 p.

Câmara, G. 1993. Anatomia de sistemas de informações geográficas: visão atual e perspectivas de evolução. In: Assad, E., Sano, E. **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Brasília: Embrapa, 434 p.

Câmara, G. M. S. 1998. Ecofisiologia da soja e rendimento. In: Câmara, G. M.S. **Soja: tecnologia de produção**. Piracicaba: ESALQ, p. 256-277.

Câmara, G., Medeiros, J. S. 1993. Princípios básicos em geoprocessamento. In. Assad, E. D.; Sano, E. E. **Sistemas de Informações Geográficas - Aplicações na Agricultura**. Brasília: Embrapa, 434 p.

Câmara, G.; Carvalho, M. S.; Cruz, O. G.; Correa, V. 2002. Análise espacial de áreas. In: Fuks, S. D.; Carvalho, M. S.; Câmara, G.; Monteiro, A. M. V. (Eds.). **Análise espacial de dados geográficos**. São José dos Campos: INPE, 44 p.

Câmara, G.; Monteiro, A. V. M.; Druck, S.; Carvalho, M. S. 2004. Análise espacial e geoprocessamento. In Druck, S.; Carvalho, M. S.; Câmara, G.; Monteiro, A. V. M. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: Embrapa.

Campos, M. C. 2010. **A Embrapa/Soja em Londrina - PR a pesquisa agrícola de um país moderno**. Tese (Doutorado) – Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 123 f.

Carvalho, A. D. F.; Silva, G. O. 2017. A importância do melhoramento genético e de sistemas de produção para a sustentabilidade da agricultura brasileira. In: Lopes, C. A.; Pedroso, M. T. M. (Ed.). **Sustentabilidade e horticultura no Brasil: da retórica à prática**. Brasília, DF: Embrapa. p. 111-137.

Carvalho, H. V. M. 2014. As evidências dos benefícios do consumo das isoflavonas da soja na saúde da mulher: revisão de literatura. **UNOPAR Científica, Ciências biológicas e da Saúde**, v. 16, n. 4, p. 353-359.

Carvalho, R. 1999. **Amazônia rumo ao 'ciclo da soja'**. Amazônia Papers # 2, Ano I. Amigos da Terra, Programa Amazônia.

Cho, S.; Newman, D. H. 2005. Spatial analysis of rural land development. **Forest Policy and Economics**, v. 7, n. 5, p. 732–744.

Clemente, A. M.; Carvalho Júnior, O. A.; Guimarães, R. F; McManus, C.; Turazi, C. M. V.; Hermuche, P. M. 2017. Spatial-temporal patterns of bean crop in Brazil over the period 1990–2013. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, Paper n. 107, 18 p.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2013. **Perspectivas para a agropecuária - safra 2015/2016**. Brasília: CONAB, 130 p. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_09\\_24\\_11\\_44\\_50\\_perspectivas\\_agropecuaria\\_2015-16\\_-\\_produtos\\_verao.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_09_24_11_44_50_perspectivas_agropecuaria_2015-16_-_produtos_verao.pdf)> Acesso em: 22 fev. 2017.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2017. **Levantamento de safra**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?A=1253>> Acesso em: 28 mar. 2017.

Cremones, P. A.; Feroldi, M.; Nadaleti, W. C.; Rossi, E.; Feiden, A.; Camargo, M. P.; Cremones, F. E.; Klajn, F. F. 2015. Biodiesel production in Brazil: Current scenario and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 415-428.

Cunha, A. S.; Mueller, C. C.; Alves, E. R. A.; Silva, J. E. 1993. Uma avaliação da sustentabilidade da agricultura nos Cerrados. **Estudos de Política Agrícola**, n. 2, Brasília: IPEA, p. 35-52.

Cunha, G. R.; Hass, J. C.; Dalmago, G. A.; Pasinato, A. 1988. Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, n.1, p.111-119.

Dall' Agnol, A. **Soja: o fenômeno brasileiro**. Londrina: EMBRAPA, 2008.

Dalposso, G. H. 2010. **Estatística espacial aplicada à agricultura de precisão**. Dissertação (Mestrado) - Cascavel: Universidade Oeste do Paraná, 66 f.

Delgado, G. C. 1985. **Capital financeiro e agricultura no Brasil**. Campinas: Unicamp/Cone, 240 p.

Dobbs, R.; Oppenheim, J.; Thompson, F.; Brinkman, M.; Zornes, M. **Resource revolution: meeting the world's energy, materials, food, and water needs**. McKinsey Global Institute, p. 209.

Donfouet, H. P. P.; Barczak, A.; Dessendre, C. D.; Maigné, E. 2017. Crop production and crop diversity in France: a spatial analysis. **Ecological Economics**, v. 134, p. 29-39.

Donzeli, P. L.; Valério Filho, M.; Pinto, S. A. F.; Nogueira, F. P.; Rotta, C. L.; Lombardi Neto, F. 1992. **Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao diagnóstico básico para planejamento e monitoramento de microbacias hidrográficas**. Campinas: Documentos IAC, 119 p.

Donzeli, P. L.; Valério Filho, M.; Pinto, S. A. F.; Nogueira, F. P.; Rotta, C. L.; Lombardi Neto, F. 1992. Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao diagnóstico básico para planejamento e monitoramento de microbacias hidrográficas. **Documentos IAC**, v. 29, p. 91-119.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2011. **Download GIS**. Disponível em: <<http://forest-gis.com/download-de-shapefiles/>> Acesso em: 10 mar. 2017.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2013. **Tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa Soja, 265 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2015. **Desenvolvimento territorial estratégico para região do MATOPIBA**. Campinas: Embrapa GITE. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/gite/projetos/matopiba/index.html>> Acesso em: 10 mar. 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2017. **História da soja**. Londrina: Embrapa Soja. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/historia>> Acesso em: 01 mar. 2017.

Espíndola, C. J.; Cunha, R. C. C. 2015. A dinâmica geoeconômica recente da cadeia produtiva de soja no Brasil e no Mundo. **Geotextos**, v. 11, n. 1, p. 217-238.

Fan, C.; Myint, S. W.; Rey, S. J.; Li, W. 2017. Time series evaluation of landscape dynamics using annual Landsat imagery and spatial statistical modeling: Evidence from

the Phoenix metropolitan region. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 58, p. 12-25.

FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2017. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2017. Building resilience for peace and food security**. Roma, FAO. 117 p. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-I7695e.pdf>> Acesso em: 15 dez. 2017.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2003. **World agriculture: towards 2015/2030. An FAO perspective**. Londres: Earthscan Publications Ltd., 432 p.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2015. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015-2024**. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i4738e.pdf>> Acesso em: 12 dez. 2017.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2014. **FAOSTAT**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>> Acesso em: 01 mar. 2017.  
Fearnside, P. M. 2001. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, v. 28, n. 1, p. 23-38.

Fehr, W. R.; Caviness, C. E. 1977. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, Cooperative Extension Service, 12 p.

Fernandes, F. H. S. 2017. **Estimativa da degradação de pastagens cultivadas do Cerrado mineiro com base na técnica de Eficiência no Uso da Água (WUE - Water Use Efficiency)**. Dissertação (Mestrado) – Brasília: Universidade de Brasília, 121 f.

Ferreira, M.; Coelho, A. 2015. Desmatamento recente nos estados da amazônia legal: uma análise da contribuição dos preços agrícolas e das políticas governamentais. **Revista de Economia E Sociologia Rural**, v. 53, p. 91-108.

Ferreira, M.; Ferreira, L.; Latrubesse, E.; Miziara, F. 2013. Considerations about the land use and conversion trends in the savanna environments of Central Brazil under a geomorphological perspective. **Journal of Land Use Science**, p. 1-15.

Figueiredo, P. N. 2016. New challenges for public research organisations in agricultural innovation in developing economies: evidence from Embrapa in Brazil's soybean industry. **The Quarterly Review of Economics and Finance**, v. 62, p. 21-32.

FMI. Fundo Monetário Internacional. 2017. **International Financial Statistics**. Washington: FMI. Disponível em: <<http://www.imf.org/external/datamapper/datasets/IFS>> Acesso em: 01 mar. 2017.

Franks, J. R. 2014. Sustainable intensification: A UK perspective. **Food Policy**, v. 47, p. 71-80.

Frota, A. B.; Campelo, G. J. A. 1999. Evolução e perspectivas da produção de soja na região Meio-Norte do Brasil. In: Queiroz, M. A.; Goedert, C. O.; Ramos, S. R. R. **Recursos Genéticos e Melhoramento de Plantas para o Nordeste brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, p. 48-60.

Galford, G. L.; Mustard, J. F.; Melillo, J.; Gendrin, A.; Cerri, C. C.; Cerri, C. E. P. 2005. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 2, p. 576-587.

Gibbs, H. K.; Ruesch, A. S.; Achard, F.; Clayton, M. K.; Holmgren, P.; Ramankutty, N.; Foley, J. A. 2010. Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980 and 1990. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the U. S. A.**, v. 107, p. 16732-16737.

Gilioli, J. L.; Terasawa, F.; Willemann, W.; Artiaga, O. P.; Moura, E. A. V.; Pereira, W. V. 1995. **Soja: Série 100**. Cristalina, Goiás: FT Sementes, 18 p.

Gollnow, F.; Lakes, T. 2014. Policy change, land use, and agriculture: The case of soy production and cattle ranching in Brazil, 2001–2012. **Applied Geography**, v. 55, p. 203-211.

Goodchild, M. F. 1987. A spatial analytical perspective on geographical information systems. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 1, n. 4, p. 327-334.

Guimarães, E. N.; Leme, H. J. C. 1997. Caracterização histórica e configuração espacial da estrutura produtiva do Centro-Oeste. In: **Redistribuição da população e meio ambiente: São Paulo e Centro-Oeste**. Campinas: Unicamp/Nepo, p. 25-65.

Hansen, M. C.; Stehman, S. V.; Potapov, P. V. 2009. Quantification of global gross forest cover loss. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the U. S. A.**, v. 107, p. 8650-8655.

Hirakuri, M. H.; Lazzarotto, J. J. 2014. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro**. Londrina: Embrapa, 70 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2002. **Geociências**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <[https://downloads.ibge.gov.br/downloads\\_geociencias.htm](https://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm)> Acesso em: 28 mar. 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2004. **Geociências**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <[https://downloads.ibge.gov.br/downloads\\_geociencias.htm](https://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm)> Acesso em: 28 mar. 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2015. **Produto Interno Bruto dos Municípios 2012**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2012/>> Acesso em: 28 mar. 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2016a. **Malhas Digitais**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: < <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>> Acesso em: 28 mar. 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2016b. **Mapas**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/tematicos>> Acesso em: 28 mar. 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2016c. **Cidades**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/>> Acesso em: 28 mar. 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2017. **Sistema IBGE de Recuperação Automática. Banco de tabelas estatísticas**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/>> Acesso em: 28 mar. 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2018. **METABD. Banco de metadados**. Disponível em: <<https://metadados.ibge.gov.br/consulta/prnRelatorioPesquisa.aspx?codPesquisa=PA>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

IFPRI. International Food Policy Research Institute. 2013. **2012 Global Food Policy Report**. Washington: IFPRI. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2499/9780896295537>> Acesso em: 02 fev. 2017.

Igreja, A. C. M.; Packer, M. F. E; Rocha, M. B. 1988. **A evolução da soja no estado de Goiás e seu impacto na composição agrícola**. São Paulo: Instituto de Economia Agrícola, 20 p.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2014. **PRODES**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>> Acesso em: 12 dez. 2017.

Javari, M. 2017. Spatial monitoring and variability of daily rainfall in Iran. **International Journal of Applied Environmental Sciences**, v. 12, n. 5, p. 801-824.

Kendall, M. G. 1975. **Rank Correlation Methods**. Londres: Charles Griffin, 4<sup>a</sup> ed.

Köppen, W. 1948. **Climatologia: con um estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Econômica, 478 p.

Kohori, C. B. 2017. **Mudanças no uso da terra no alto curso da bacia do Ribeirão dos Ranchos - Adamantina/SP e impactos sobre os cursos d'água**. Dissertação (Mestrado) - Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista, 110 f.

Kurina, F. G.; Hang, S.; Cordoba, M. A.; Negro, G. J.; Balzarini, M. G. 2018. Enhancing edaphoclimatic zoning by adding multivariate spatial statistics to regional data. **Geoderma**, v. 310, p. 170-177.

Lambin, E. F.; Gibbs, H. K.; Ferreira, L.; Grau, R.; Mayaux, P.; Meyfroidt, P.; Morton, D. C.; Rudel, T. K.; Gasparri, I.; Munger, J. 2013. Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach. **Global Environmental Change**, v. 23, p. 892-901.

Lambin, E. F.; Meyfroidt, P. 2011. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the U. S. A.**, v. 108, p. 3465-3472.

Lima, D. P.; Fiorioli, J. C.; Padula, A. D.; Pumi, G. 2017. The impact of Chinese imports of soybean on port infrastructure in Brazil: A study based on the concept of the "Bullwhip Effect". **Journal of Commodity Markets**, available online 9 nov. 2017.

Lumbreras, J. F.; Carvalho Filho, A.; Motta, P. E. F.; Barros, A. H. C.; Aglio, M. L. D.; Dart, R. O.; Silveira, H. L. F.; Quartaroli, C. F.; Almeida, R. E. M.; Freitas, P. L. 2015. **Aptidão agrícola das terras do MATOPIBA**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 48 p. (Documentos, 179).

Macedo, M. N.; Defries, R. S.; Morton, D. C.; Stickler, C. M.; Galford, G. L.; Shimabukuro, Y. E. 2012. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the U. S. A.**, v. 109, p. 1341-1346.

Magalhães, L. A.; Miranda, E. E. de. 2014. **MATOIIBA: Quadro Natural. Nota técnica 5**. EMBRAPA. Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE). Disponível em: <[https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT5\\_Matopiba\\_Quadro\\_Natural.pdf](https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT5_Matopiba_Quadro_Natural.pdf)> Acesso em: 12 jan. 2017.

Magalhães, M. A. F. M.; Medronho, R. A. 2017. Análise espacial da tuberculose no Rio de Janeiro no período de 2005 a 2008 e fatores socioeconômicos associados utilizando microdados e modelos de regressão espaciais globais. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n. 3, p. 831-839.

Maire, G.; Dupuy, S.; Nouvellon, Y.; Loos, R. A.; Hakamada, R. 2014. Mapping short-rotation plantations at regional scaling using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 152, p. 36-149.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2015. **Câmara setorial avalia situação do mercado de biodiesel**. Disponível em: <[https://www.agrolink.com.br/noticias/camara-setorial-avalia-situacao-do-mercado-de-biodiesel\\_220547.html](https://www.agrolink.com.br/noticias/camara-setorial-avalia-situacao-do-mercado-de-biodiesel_220547.html)> Acesso em: 20 dez. 2017.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2016a. **Estatísticas**. Brasília: MAPA. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/estatisticas>> Acesso em: 28 mar. 2017.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2016b. **Projeções do Agronegócio. Brasil 2015/16 a 2025/26. Projeções de longo prazo**. Brasília: MAPA, 7ª ed., 138 p.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2016b. **Plano Agrícola e Pecuário 2016-2017**. Brasília: MAPA/SPA. 46 p. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-agricola-e-pecuario/arquivos-pap/livropap1617.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2017.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2017. **AGROSTAT-Estatísticas de comércio exterior do agronegócio brasileiro, indicadores gerais**. Disponível em: <<http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>>. Acesso em: 05 dez. 2017.

Marcos Filho, J.; Novembre, A. D. L. C. 1990. **Características agronômicas e fenologia da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) sob influência da época de semeadura**. Dissertação (Mestrado) – São Paulo: Universidade de São Paulo, 57 f.

Martins, M. C.; Câmara, G. M. S.; Peixoto, C. P.; Marchiori, L. F. S.; Leonardo, V. Mattiazzi, P. 1999. Épocas de semeadura, densidades de plantas e desempenho vegetativo de cultivares de soja. **Scientia Agricola**. v. 56, n. 4, p. 851-858.

Mesquita, B. A. 2011. **O Desenvolvimento Desigual da Agricultura: A Dinâmica do Agronegócio e da Agricultura Familiar**. São Luís: EDUFMA, 110 p.

Miranda, E. E.; Magalhães, L. A.; Carvalho, C. A. 2014a. **Proposta de delimitação territorial do Matopiba. Nota técnica 1**. EMBRAPA. Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE). Disponível em: <[https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1\\_DelimitacaoMatopiba.pdf](https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMatopiba.pdf)> Acesso em: 12 jan. 2017.

Miranda, E. E.; Magalhães, L. A.; Carvalho, C. A. 2014b. **Um sistema de inteligência territorial estratégica para o Matopiba. Nota técnica 2**. EMBRAPA. Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE). Disponível em: <[https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT2\\_SITEMatopiba.pdf](https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT2_SITEMatopiba.pdf)> Acesso em: 12 jan. 2017.

Monteiro, R. N. F. 2011. **Zoneamento agrícola de risco climático para a cultura da soja no Estado do Piauí, em cenários de mudanças climáticas**. Dissertação (Mestrado) – Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 97 f.

Moran, P. A. P. 1948. The interpretation of statistical maps. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 10, p. 243-251.

- Moran, P. A. P. 1950. Notes on continuous stochastic phenomena. **Biometrika**, v.37, p. 17–23.
- Morton, D. C.; Noojipady, P.; Macedo, M. M.; Gibbs, H.; Victoria, D. C.; Bolfe, E. L. 2016. Reevaluating suitability estimates based on dynamics of cropland expansion in the Brazilian Amazon. **Global Environmental Change**, v. 37, p. 92-101.
- Mueller, B.; Mueller, C. 2016. The political economy of the Brazilian model of agricultural development: Institutions versus sectoral policy. **The Quarterly Review of Economics and Finance**, v. 62, p. 12-20.
- Muller, H.; Rufin, P. H.; Griffiths, P.; Siqueira, A. J. B.; Hostert, P. 2015. Mining dense Landsat time series for separating cropland and pasture in a heterogeneous Brazilian savanna landscape. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 490-499.
- Nackoney, J.; Rybock, D.; Dupain, J.; Facheux, C. 2013. Coupling participatory mapping and GIS to inform village-level agricultural zoning in the Democratic Republic of the Congo. **Landscape and Urban Planning**, v. 110, p. 164-174.
- OCDE/FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2015. **OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2015-2024**. Paris: OECD Publishing. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2015-es](http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-es)> Acesso em: 02 fev. 2017.
- Paludzyszyn Filho, E. 1995. **A cultura da soja no Maranhão**. Londrina: Embrapa-CNPSo, 34 p. (Documentos, 84.).
- Paludzyszyn Filho, F.; Kiihl, R. A. S.; Almeida, L. A. 1993. Desenvolvimento de cultivares de soja na região Norte e Nordeste do Brasil. In: Arantes, N. E.; Souza, P. I. de M. de. **Cultura da soja nos Cerrados**. Piracicaba: Potáfos, p. 255-263.
- Passioura, J. B. Roots and drought resistance. 1983. **Agricultural Water Management**, v. 7, p. 265-280.

Pereira, L. I.; Pauli, L. 2016. O processo de estrangeirização da terra e expansão do agronegócio na região do Matopiba. **Revista de Geografia Agrária**, edição especial, v. 11, n. 23, p. 196-224.

Pollo, R. A. 2013. **Diagnóstico do uso do solo na bacia hidrográfica do Ribeirão do Paraíso no município de São Manuel (SP), por meio de geotecnologias**. Dissertação (Mestrado) – Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 63 f.

Portal Brasil. 2015. "**Matopiba**" se consolida como nova fronteira agrícola do País. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2015/10/matopiba-se-consolida-como-nova-fronteira-agricola-do-pais>> Acesso em: 25 mar. 2017.

Porter, M. E. 1996. Competitive advantage, agglomeration economies, and regional policy. **International Regional Science Review**, v. 19, n. 1-2, p. 85-90.

Ritchie, S.; Hanway, J. J.; Thompson, H. E. 1982. **How a soybean plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 53 p.

Rosa, D. P. 2017. **Diversidade fenotípica e molecular e relações entre caracteres de soja adaptada às regiões Sul, Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado) – Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 121 f.

Rosemberg, L. A.; Rinne, R. W. 1986. Moisture loss as a prerequisite for seedling growth in soybean seeds (*Glycine max* L. Merr.). **Journal of Experimental Botany**, v. 37, p. 1663-1674.

Sano, E. E.; Rosa, R.; Brito, J. L. S.; Ferreira, L. G. 2010. Land cover mapping of the tropical savana region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 166, p. 113-124.

Santos Filho, J. I. S.; Talamini, D. J. D.; Scheuermann, G. N.; Bertol, T. M. 2016. Potencial do Matopiba na produção de aves e suínos. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 90-102.

Santos, J. P. 2015. **Análise espacial da Hantavirose por meio do uso de sistemas de informações geográficas e de modelagem de nicho ecológico no estado de Goiás e no Distrito Federal**. Tese (Doutorado) – Brasília: Universidade de Brasília, 148 p.

Sedyama, T. 2009. **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Mecenaz, 314 p.

Silva, F. B.; Santos, J. R. N.; Feitosa, F. E. C. S.; Silva, I. D. C.; Araújo, M. L. S.; Guterres, C. E.; Santos, J. S.; Ribeiro, C. V.; Bezerra, D. S.; Neres, R. L. 2016. Evidências de mudanças climáticas na região de transição Amazônia-Cerrado no estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 330-336.

Silva, P.; Hayo, M.; Spies, A.; Soares, S. 2010. Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 1831-1839.

Silva, V. P.; Werf, H. M. G. V.; Spies, A.; Soares, S. R. 2010. Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 9, p. 1831-1839.

Spagnolo, T. F. O. 2011. **Análise da dinâmica espacial da expansão agrícola no Oeste baiano entre 1984 e 2008: estudo de caso do município de São Desidério-BA**. Dissertação (Mestrado) – Brasília: Universidade de Brasília, 69 f.

Spera, S.; Galford, G.; Coe, M.; Mustard, J. 2016. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 1, p. 1-34.

Studte, M. 2008. **A expansão da fronteira agrícola e a agricultura familiar no Cerrado Maranhense**. Dissertação (Mestrado) – São Paulo: Universidade de São Paulo; Berlin: Universidade Técnica de Berlin, 55 f.

Tabacow, J. W.; Xavier-da-Silva, J. 2010. Geoprocessamento aplicado à análise da fragmentação da paisagem na Ilha de Santa Catarina. In: Xavier-da-Silva, J.; Zaidan, R. T. **Geoprocessamento e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 35-68.

Thomas, J. F. 1994. Ontogenetic and morphological plasticity in crop plants. In: Boote, K. J. et al. (Comp.) **Physiology and determinations of crop yield**. Cap. 7B, p. 181-185.

Tilman, D.; Balzer, C.; Hill, J.; Befort, B. L. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the U. S. A.**, v. 108, p. 20260-20264.

Torres, E.; Saraiva, O. F.; Galerani, P. R. 1993. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 71 p.

USDA. United States Department of Agriculture. 2017. **World Agricultural Production**. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>> Acesso em: 28 mar. 2017.

Vera-Diaz, M. D. C.; Kaufmann, R.; Nepstad, D.; Schlesinger, P. 2008. An interdisciplinary model of soybean yield in the Amazon basin: the climatic, edaphic, and economic determinants. **Ecological Economics**, v. 65, n. 2, p. 420-431.

Wesz Junior, V. J. 2014. **O mercado da soja e as relações de troca entre produtores rurais e empresas no Sudeste de Mato Grosso (Brasil)**. Tese (Doutorado) – Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 220 f.

Xiao, R.; Su, S.; Mai, G.; Zhang, Z.; Yang, C. 2015. Quantifying determinants of cash crop expansion and their relative effects using logistic regression modeling and variance partitioning. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 34, p. 258-263.

Yu, T. H. E.; Cho, S.; Koç, A. A.; Boluk, G.; Kim, S. G.; Lambert, D. M. 2014. Evaluating spatial and temporal variation in agricultural output elasticities in Turkey. **Agricultural Economics**, v. 45, p. 279-290.

Yuan, Y.; Cave, M.; Zhang, C. 2017. Using Local Moran's I to identify contamination hotspots of rare earth elements in urban soils of London. **Applied Geochemistry**, v. 88, Part B, p. 167-178.

Zakir, M. M.; Freitas, I. R. 2015. Benefícios à saúde humana do consumo de isoflavonas presentes em produtos derivados da soja. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 2, n.3, p.107-116.

Zhang, T.; Lin, G. 2016. On Moran's *I* coefficient under heterogeneity. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 95, p. 83-94.

Zhang, Z.; Su, S.; Xiao, R.; Jiang, D.; Wu, J. 2013. Identifying determinants of urban growth from a multi-scale perspective: a case study of the urban agglomeration around Hangzhou Bay, China. **Applied Geography**, v. 45, p. 193-202.

Zuanazzi, J. A. S.; Mayorga, P. 2010. Fitoprodutos e desenvolvimento econômico. **Química Nova**, v. 33, n. 6, p. 1421-1428.