



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**ÍNDICE PADRONIZADO DE PRECIPITAÇÃO (SPI) E A  
VARIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA SOJA NO DISTRITO  
FEDERAL E EM MUNICÍPIOS DO ESTADO DE GOIÁS**

**NATHÁLIA RODRIGUES DOS SANTOS**

Brasília-DF

Dezembro, 2019

NATHÁLIA RODRIGUES DOS SANTOS

**ÍNDICE PADRONIZADO DE PRECIPITAÇÃO (SPI) E A VARIAÇÃO DA  
PRODUTIVIDADE DA SOJA NO DISTRITO FEDERAL E EM MUNICÍPIOS DO  
ESTADO DE GOIÁS**

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e  
Medicina Veterinária como parte das  
exigências do curso de Graduação em Agronomia,  
para a obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Orientadora: Profa. Dr<sup>a</sup>. Selma Regina Maggiotto

Brasília-DF

Dezembro, 2019

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SN274?	Santos, Nathália Rodrigues dos Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e a variação da produtividade da soja no Distrito Federal e em municípios do Estado de Goiás / Nathália Rodrigues dos Santos; orientador Selma Regina Maggiotto. -- Brasília, 2019. 45 p.  Monografia (Graduação - Agronomia) -- Universidade de Brasília, 2019.  1. Produtividade de soja. 2. Seca. 3. SPI. I. Maggiotto, Selma Regina, orient. II. Título.
--------	--

### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, N. R. Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e a variação da produtividade da soja no Distrito Federal e em municípios do Estado de Goiás. 45 p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade de Brasília – UnB.

### CESSÃO DE DIREITOS

Nome do Autor: NATHÁLIA RODRIGUES DOS SANTOS

Título da Monografia de Conclusão de Curso: Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e a variação da produtividade da soja no Distrito Federal e em municípios do Estado de Goiás

Grau: 3o      Ano: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

NATHÁLIA RODRIGUES DOS SANTOS

CPF: 041.329.191-02

Cond. Jardim Botânico VI, conj, J, cs. 05.

CEP: 71.680-369, Jardim Botânico, DF, Brasil.

Email: nathaliards.rodrigues.santos@gmail.com



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

Termo de Aprovação

Autora: Nathália Rodrigues dos Santos

Título: Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e a variação de produtividade da soja no Distrito Federal e em municípios do Estado de Goiás

Monografia de conclusão do curso de Graduação em Agronomia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília – UnB.

Aprovada em: Brasília, 5 de dezembro de 2019.

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Selma Regina Maggiotto  
Universidade de Brasília – UnB  
Orientadora

---

Prof. Dr. João José da Silva Júnior  
Universidade de Brasília – UnB  
Examinador

---

Prof. Dr. Jean Pierre Medaets  
Universidade de Brasília – UnB  
Examinador

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pois sem ele eu não teria forças para esta longa jornada; aos meus pais, José Antônio e Bernadete, pilares da minha formação, e à minha irmã Jéssica.*

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço a Deus por ser essencial em minha vida, autor do meu destino e meu guia. Sem ele nada seria possível;*

*À Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, e aos seus funcionários, pelo apoio e suporte durante todos esses anos de Graduação;*

*A todos meus professores que me acompanharam durante o curso, contribuintes na formação desta futura Engenheira Agrônoma;*

*À minha Orientadora Selma Regina Maggiotto, com quem compartilhei minhas dúvidas e angústias. Pelas valiosas e incontáveis horas dedicadas ao projeto, sempre com uma presença cheia de otimismo. Por seus ensinamentos, paciência, pelo convívio, pelo apoio, pela compreensão e pela amizade. Minha eterna gratidão por tudo o que fez por mim;*

*A todos os meus colegas de curso, especialmente às minhas colegas Giovanna, Kênnia, Martha, Muriene e Sara, pelos grupos de estudos, pelos auxílios nas horas de dúvidas, pelo ombro amigo, pelas risadas e por tudo o que fizeram por mim;*

*Aos meus colegas de trabalho do Ministério da Agricultura, pelo suporte e apoio;*

*Aos meus chefes Pedro Loyola, Hugo Borges e Luis Balduino, agradeço pela oportunidade de trabalhar no Zoneamento Agrícola e pela compreensão nos momentos em que estive ausente para terminar minha formação;*

*Aos meus pais por todo amor e carinho, pelo apoio incondicional em todos os momentos difíceis da minha trajetória acadêmica. Mãe, obrigada por todos os cuidados que teve comigo, por fazer minhas marmitas, por me emprestar seu carro, por me afagar em todos os momentos de desespero e choro. Pai, obrigada por todo seu investimento e dedicação a mim depositados, por todas as vezes em que levantou cedo para me levar ou me buscar, por sua compreensão e por todos os conselhos. Obrigada pais, vocês são tudo para mim;*

*Ao namorado Henrique Vinícius, a pessoa com quem amo partilhar a vida. A pessoa que estudou junto comigo, que esteve todo tempo ao meu lado, que me suportou durante todos os estresses que passei. Obrigada pela compreensão por todas as horas que abdiquei ao seu lado para estudar, pelo seu amor, pela sua positividade, por não desistir, pelos seus abraços nas horas de angústias, por me escutar todas as vezes que te liguei chorando. Muito obrigado meu amor. Gratidão!*

*Às minhas melhores amigas Ana, Letícia, Marianna e Pâmela que estiveram comigo desde o início desta jornada. A minha sogra, Íris, e meus cunhados, Marina e Lucas, obrigada por me aguentarem todo o final de semana, ocupando a casa de vocês e roubando o Henrique para mim.*

*A todos os que contribuíram de alguma maneira para a realização deste projeto de graduação.*

*“Esta é a tua hora, ó Alma, do teu livre voo para lá das palavras”*

*Walt Whitman*

SANTOS, N. R. Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e a variação da produtividade da soja no Distrito Federal e em municípios do Estado de Goiás. 45 p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade de Brasília – UnB.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi fazer um estudo sobre o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais, e avaliar sua relação com a produtividade da cultura da soja no Distrito Federal e em diferentes localidades do Estado de Goiás. O SPI foi calculado para as escalas temporais mensal, trimestral, semestral e anual. Foram utilizadas séries históricas de dados diários de precipitação, provenientes de estações pluviométricas convencionais do INMET, localizadas em Brasília e nos municípios de Catalão, Formosa, Ipameri e Pirenópolis, no Estado de Goiás. As séries históricas de produtividade foram obtidas junto ao IBGE e foi necessário ajustá-las para reduzir os efeitos do avanço tecnológico sobre os dados. Os valores do SPI foram analisados quanto ao número e frequência dos eventos de seca, e percentual de acerto na variação de produtividade da soja. O índice identificou períodos de extrema seca para todas as regiões estudadas. Com aumento da escala temporal ocorreu a minimização de eventos de seca identificados pelo SPI. Brasília obteve maior frequência de eventos classificados como de extrema seca na escala anual. O município de Pirenópolis apresentou maior ocorrência de eventos de categoria de extrema umidade. O SPI semestral representou melhor a variação de produtividade da soja. O município de Ipameri foi onde os valores de SPI apresentaram o maior número de acerto do índice em relação à variação da produtividade ajustada da cultura da soja.

**Palavras-chave:** Produtividade de soja, Seca, SPI.



## ABSTRACT

The objective of this study was to study the Standardized Precipitation Index (SPI) at different time scales, and to evaluate its relationship with soybean crop yield in the Federal District and in different locations in the State of Goiás. The SPI was calculated for the monthly, quarterly, semi-annual and annual time scales. Historical series of daily rainfall data from INMET conventional stations, located in Brasília and in the counties of Catalão, Formosa, Ipameri and Pirenópolis, in Goiás State, were used. The historical yield series are obtained from IBGE and it was necessary to adjust them to reduce the effects of technological advancement on data. SPI values were analyzed for the number and frequency of drought events, and percentage of accuracy in soybean yield variation. The index identified periods of extreme drought for all regions studied. With increasing time scale, drought events identified by the SPI were minimized. Brasília presented the highest frequency of events classified as extreme drought in the annual scale. The county of Pirenópolis presented the highest occurrence of extreme moisture category events. The semiannual SPI better represented soybean yield variation. The county of Ipameri was where the SPI values presented the highest number of correctness of the index in relation to the soybean crop adjusted productivity variation.

**Keywords:** Soybean yield, drought SPI.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Interação entre os tipos de seca e duração dos eventos de seca. (adaptado de WILHITE, 2000).....	16
<b>Figura 2.</b> Localização geográfica das estações meteorológicas utilizadas neste estudo. ....	26
<b>Figura 3.</b> Página inicial do programa <i>SPI Generator</i> (adaptado de NDMC, 2018). ....	29
<b>Figura 4.</b> Série temporal do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), em diferentes escalas temporais, nas cinco localidades analisadas: SPI-1 – escala mensal; SPI-3 – escala trimestral; SPI-6 – escala semestral; SPI-12 – escala anual.....	32
<b>Figura 5.</b> Frequência relativa e número de ocorrências dos valores do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), em diferentes escalas temporais, nas cinco localidades analisadas: SPI-1 – escala mensal; SPI-3 – escala trimestral; SPI-6 – escala semestral; SPI-12 – escala anual. XS: extremamente seco; MS: muito seco; OS: moderadamente seco; N: próximo ao normal; OU: moderadamente úmido; MU: muito úmido; XU: extremamente úmido.....	34
<b>Figura 6.</b> Produtividade de soja ajustada e Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais – Brasília, DF. ....	35
<b>Figura 7.</b> Produtividade de soja ajustada e Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais – Catalão, GO. ....	35
<b>Figura 8.</b> Produtividade de soja ajustada e Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais – Formosa, GO. ....	36
<b>Figura 9.</b> Produtividade de soja ajustada e Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais – Ipameri, GO.....	36
<b>Figura 10.</b> Produtividade de soja ajustada e Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais – Pirenópolis, GO.....	37
<b>Figura 11.</b> Percentual de acerto na variação de produtividade ajustada de soja, em Brasília e nos municípios do Estado de Goiás, de acordo com o uso do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) nas escalas: SPI-1 <sub>acout-mar</sub> , SPI-1 <sub>acnov-abr</sub> , SPI-6 <sub>out-mar</sub> , SPI-6 <sub>nov-abr</sub> , e SPI-SPI-12 <sub>jul-jun</sub> .....	38

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Relação de estações inicialmente selecionadas, número de dados ausentes, e porcentagem em relação ao total de dados das séries temporais de precipitação das estações convencionais do INMET (<http://www.inmet.gov.br/>).....25
- Tabela 2.** Coordenadas geográficas das estações convencionais utilizadas neste trabalho. ....26
- Tabela 3.** Classificação do Índice de Precipitação Padronizada – SPI (adaptado de WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2012). .....29
- Tabela 4.** Critérios para cálculo do percentual de acerto dos valores obtidos pelo SPI em relação à estimativa da variação na produtividade ajustada da soja. ....31

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1. Seca – Definição e tipos.....	14
2.2. Índices de quantificação de seca .....	17
2.3. Soja e a seca.....	21
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>24</b>
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>25</b>
4.1. Dados utilizados.....	25
4.2. Cálculo do SPI .....	26
4.3. Ajuste dos dados de produtividade .....	30
4.4. Análise da relação entre SPI e produtividade da soja .....	30
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
5.1. Série temporal dos valores de SPI .....	32
5.2. Frequência de ocorrência do SPI .....	33
5.3. Produtividade de soja ajustada e SPI .....	34
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>40</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A seca pode ser definida como o intervalo de tempo, geralmente da ordem de meses ou até mesmo de anos, durante o qual a precipitação diminui consideravelmente em relação ao valor climatologicamente esperado ou apropriado (PALMER, 1965). É um dos principais fatores limitantes que afetam a segurança alimentar e a sobrevivência de mais de dois bilhões de pessoas, que ocupam 41% das áreas do planeta (SOLH & GINKEL, 2014). Quando ocorre a associação com a temperatura do ar elevada, ventos fortes, baixa umidade do ar e com condições locais de solo, relacionadas, principalmente, à taxa de infiltração e retenção de água e à sua erodibilidade potencial, torna o fenômeno mais severo (FREITAS, 2005).

A agricultura é a forma dominante de uso da terra globalmente envolvendo principais atividades econômicas, sociais e culturais e fornecendo uma ampla gama de serviços ecossistêmicos. Devido à sua natureza, no entanto, a agricultura permanece altamente sensível às variações climáticas (SHIFERAW et al., 2014). Estresses abióticos, como a seca, podem reduzir, significativamente, rendimentos em lavouras, restringindo as latitudes e os solos onde espécies, comercialmente, importantes podem ser cultivadas. As implicações são enormes uma vez que, não somente produtores, mas toda a sociedade é afetada (FARIAS et al., 2001).

O Brasil é 2º maior produtor mundial de grãos de soja. O Estado de Goiás possui uma das maiores áreas plantadas desta cultura, para a Safra 2018/2019 a região possuiu cerca de 3,5 milhões de hectares ocupados para a produção destes Grãos, segundo o levantamento de junho da CONAB (2019a). O déficit hídrico é o principal fator limitante para o aumento expressão potencial de rendimento da cultura, sendo o maior fator contribuinte na variabilidade dos rendimentos de grãos (MONTEIRO, 2009).

Atualmente, o monitoramento dos diversos tipos de seca é feito com base em índices que os padronizam em escala temporal e regional permitindo, com isso, a comparação das condições hídricas de diferentes áreas. Tais quantificadores hídricos vêm sendo usados em políticas estaduais e federais como parâmetros que auxiliam a tomada de decisão quanto à adoção ou suspensão de planos de combate às implicações da seca nos diversos setores da sociedade. O Índice de Severidade de Seca de Palmer (PSDI) e o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) são os quantificadores mundialmente mais conhecidos e utilizados. (BLAIN & BRUNINI, 2007).

O Índice Padronizado de Precipitação (SPI) foi desenvolvido por McKee et al. (1993) com o intuito de alcançar uma melhor representação da variação de precipitação que ocorre em diferentes regiões. Para o cálculo do índice é necessário apenas dados históricos de precipitação. O índice permite quantificar o déficit ou o excesso de precipitação em diferentes escalas de tempo (BLAIN & BRUNINI, 2005). Essa versatilidade permite que o SPI monitore abastecimento de água a curto prazo, como a umidade do solo, importantes para produção

agrícola e de longo prazo recursos hídricos, como suprimentos de água subterrânea, fluxo e níveis de lago e reservatórios de água (HAYES et al., 1999).

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC disponibiliza gráficos com a evolução interanual do valor do Índice Padronizado de Precipitação, em 7 distintas escalas temporais, como forma de fornecer informações importantes para a tomada de decisões quanto às medidas necessárias ao combate e a mitigação dos efeitos associados às secas e as enchentes. O Instituto Nacional de Meteorologia também disponibiliza gráficos do SPI para o monitoramento climático das regiões do Brasil, utilizando 4 escalas temporais.

O objetivo deste trabalho foi fazer um estudo sobre o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais, e avaliar sua relação com a produtividade da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill), no Distrito Federal e em diferentes localidades do Estado de Goiás.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Seca – Definição e tipos

A seca é uma condição de umidade insuficiente causada por um déficit na precipitação ao longo de determinado período (MCKEE et al., 1993). Ela é considerada por muitos como o desastre natural mais complexo, porém de mais difícil entendimento, afetando mais pessoas que qualquer outro (HAGMAN et al., 1984). A seca geralmente tem o início lento, uma longa duração e se espalha, na maioria das vezes, por uma extensa área (FREITAS, 1998). É um fenômeno caracterizado como um evento normal e recorrente do clima, ocorrendo em praticamente todos os regimes climáticos, seja em áreas de alta ou de baixa pluviosidade (WILHITE, 2000).

Embora a falta de precipitação seja um fator determinante para explicar a evolução de uma seca, temperatura e vento são outros fatores meteorológicos também importantes, porque desempenham papéis chave em esgotar a água armazenada no solo e lagos por determinação de demandas agrícolas, municipais e outras demandas de água (SALAS et al., 2005).

A frequência e a severidade da ocorrência de secas e estiagem têm aumentado nos últimos anos, em diversas partes do mundo. É observada uma tendência na diminuição de precipitação, devido as alterações que ocorre nos padrões climáticos, seja por uma variabilidade natural do clima ou consequência de ações antrópicas. Simulações climáticas feitas a partir de modelos de circulação global da atmosfera mostram resultados de climas mais extremos para o futuro, ora com chuvas abundantes e de curta duração, ora com longos períodos secos (IPCC, 2012).

O aumento das secas e estiagens tem, entre seus impactos, ameaças à produção de alimentos, à geração de energia e à saúde das populações (MMA, 2017). Como resultado direto do aumento da frequência, severidade e duração da seca, e do estreitamento da lacuna entre o suprimento e a demanda de água, houve um aumento notável nos impactos associados à seca nos países (WILHITE; SIVAKUMAR; PULWARTY, 2014).

A agricultura é geralmente o primeiro setor econômico a ser afetado pela seca, porque os suprimentos de umidade do solo são rapidamente esgotados, especialmente se o período de deficiência de umidade está associado a altas temperaturas e condições de vento intenso (NORTH; PYLE; ZHANG, 2015). De acordo com o Diretor-Geral da FAO, José Graziano da Silva (SILVA, 2019), em pronunciamento em Roma, na Itália, para o Dia Mundial de Combate à Desertificação e à Seca, 80% de todos os danos e perdas causados pela seca foram absorvidos pelos agricultores e pelo setor agrícola.

A seca pode ser dividida em quatro tipos diferentes de acordo com Wilhite & Glantz (1985): meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica. A seca meteorológica se caracteriza pela falta de água induzida pelo desequilíbrio entre a precipitação e a evaporação, a qual depende de outros elementos como a velocidade do vento, temperatura, umidade do ar e insolação (FERNANDES et al., 2009). A seca agrícola está relacionada à ausência de umidade no solo o que torna insuficiente o suprimento de água às culturas, para repor as perdas por evapotranspiração (HOUNAM et al., 1975). A seca hidrológica é definida como o déficit de

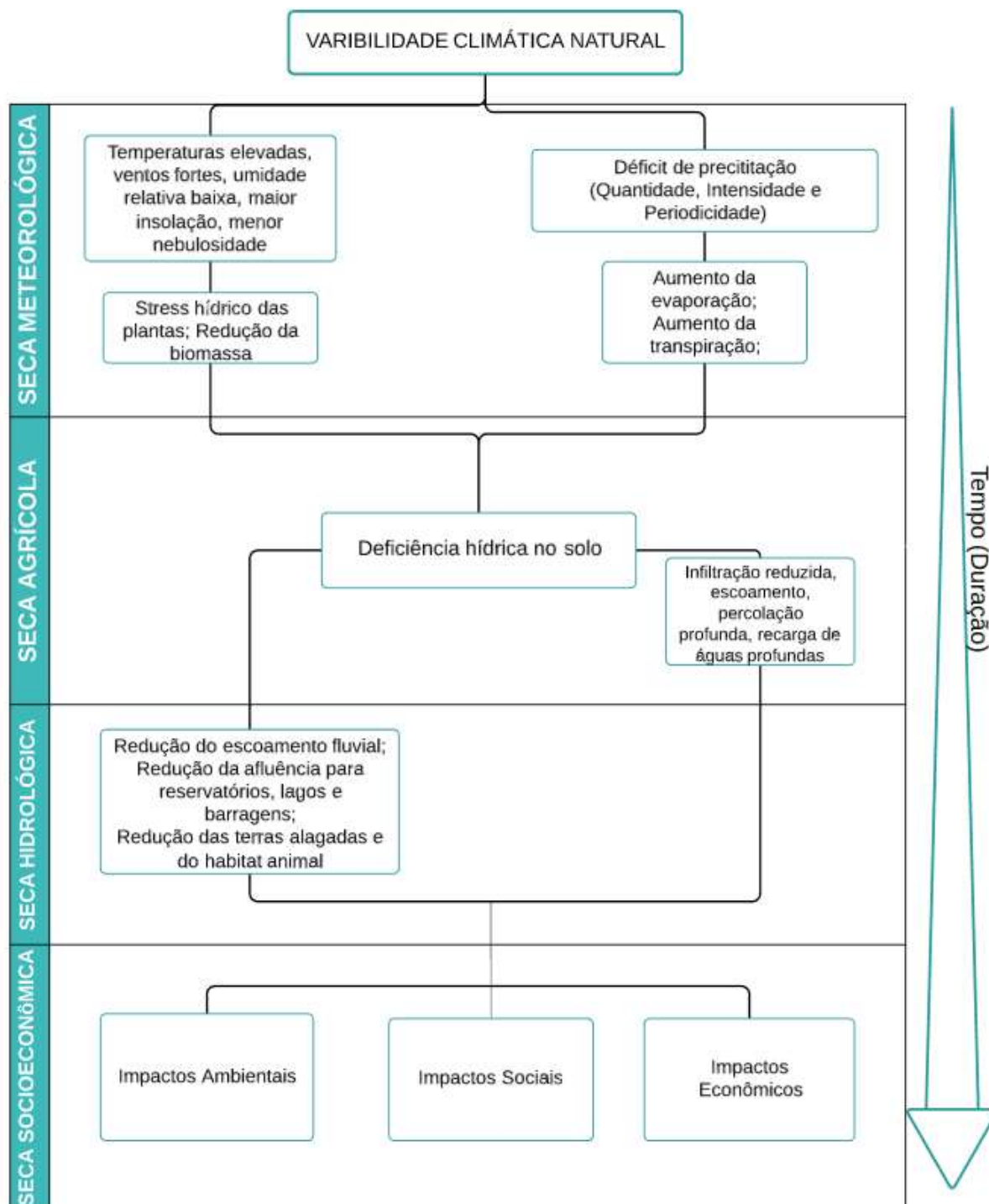
água nos reservatórios superficiais, como rios e lagos, reservatórios subterrâneos, como os aquíferos (FREITAS, 1996). Com o prolongar da seca meteorológica, e consequentemente da agrícola e hidrológica, podem-se atingir casos de extrema seca, que afetam profundamente a agricultura, os reservatórios de água, ecossistemas e condições básicas necessárias às populações, designada por seca socioeconômica (RAMALHO, 2013).

O fluxograma apresentado na Figura 1 mostra a interação entre os tipos e duração dos eventos de seca e uma possível evolução temporal na cadeia de fenômenos resultantes de uma seca. O início é dado pela seca meteorológica, onde uma série de eventos são desencadeados que geram a denominada seca agrícola e, mais tarde, em função da longa duração do período da seca, torna-se uma seca hidrológica, com impactos na afluência para reservatórios e lagos. Por fim, ocorre a seca socioeconômica, que impacta os setores sociais, ambientais e econômicos (FERNANDES et al., 2009).

A ocorrência de secas depende de sistemas meteorológicos, do relevo e dos fenômenos climáticos de grande escala que influenciam as variáveis que definem o comportamento e a circulação da atmosfera. Muitas regiões do mundo estão suscetíveis à ocorrência de secas, principalmente as regiões equatoriais onde a insolação é maior (GUEDES; MACEDO; DE SOUSA, 2012). O Centro-Oeste brasileiro caracteriza-se como uma das regiões de maior vulnerabilidade à seca, e o Estado do Goiás se destaca neste aspecto (MMA, 2017).



**Figura 1.** Interação entre os tipos de seca e duração dos eventos de seca. (adaptado de WILHITE, 2000).



## 2.2. Índices de quantificação de seca

O monitoramento de períodos de secas pode ser efetuado através da implementação de índices (FREITAS, 1998). A utilização desses para quantificar a seca se faz necessária para determinar a intensidade, a duração e a frequência em que essa anomalia ocorre, pois, a produtividade das culturas é diretamente influenciada pela ocorrência de secas agrícolas na região (FERNANDES et al., 2010).

As secas podem surgir de uma variedade de processos hidrometeorológicos que suprimem precipitação e/ou limitam a disponibilidade de água superficial ou subterrânea, criando períodos mais seco que o normal ou limitando a disponibilidade de água a um ponto potencialmente prejudicial (World Meteorological Organization (WMO) & Global Water Partnership (GWP), 2016).

Palmer (1965) desenvolveu um índice capaz de medir a severidade da seca, conhecido como Índice de Severidade de Seca de Palmer (*Palmer Drought Severity Index – PSDI*). Seu objetivo é fornecer medidas normalizadas das condições de umidade de modo que comparações usando o índice possam ser feitas ente localidades e entre meses (FERNANDES et al., 2009). Para se calcular o índice é necessário utilizar como dados de entrada, uma série histórica completa de dados mensais de precipitação e temperatura, além dos termos da equação do balanço hídrico, incluindo a evapotranspiração, *runoff*, recarga do solo e perda de umidade na camada superficial do solo. O índice pode ser utilizado para avaliar a seca na agricultura além de monitorar outros tipos de impactos provocados por este fenômeno (World Meteorological Organization (WMO) & Global Water Partnership (GWP), 2016). Para estimar a capacidade de armazenamento de água nos solos é necessário pelo menos cerca de 30 anos de dados diários de precipitação e de temperatura. O PSDI é um valor adimensional onde valores variam entre 4 e -4, onde os valores negativos representam condições de seca (KEYANTASH & DRACUP, 2002).

Criado com o objetivo de melhorar o entendimento das chuvas de monções na Índia, determinando episódios de enchentes e secas usando precipitação mensal, o Índice de Área de Seca (*Drought Area Index – DAI*) foi desenvolvido por Bhalme & Mooley (1980). Este índice possui uma ferramenta mais simples que o PSDI, utilizando somente dados de precipitação, e compara a precipitação mensal durante o período crítico das monções, as intensidades dos períodos chuvoso e seco, e o significado da secura, com base na contribuição da precipitação de cada mês até a estação total das monções (World Meteorological Organization (WMO) & Global Water Partnership (GWP), 2016). O DAI foi desenvolvido especificamente para a Índia, porém ele pode ser calibrado para outras regiões do mundo (KEYANTASH & DRACUP, 2002).

O Índice de Anomalia de Chuva (*Rainfall Anomaly Index – RAI*) é um índice que incorpora um procedimento de classificação para atribuir magnitudes a anomalias de precipitação positivas e negativas (KEYANTASH; DRACUP, 2002). Desenvolvido por Rooy (1965) o índice é considerado simples por possuir apenas um único tipo de dado de entrada para quantificar a seca. Para seu cálculo é necessário dados históricos mensais completos de precipitação uma estação de uma determinada região, por isso com o RAI é possível analisar a

seca em diversas escalas temporais sendo utilizado para identificar os impactos da seca em várias áreas (World Meteorological Organization (WMO) & Global Water Partnership (GWP), 2016). Assim como o PDSI, o Índice de Anomalia de Chuva pode variar de condições extremamente úmido ( $\geq 4$ ) à extremamente seco ( $\leq -4$ ) (FERNANDES et al., 2009).

Uma outra ferramenta que é utilizada para quantificar a seca é o Índice de Severidade de Herbst (*Herbst Severity Index – HSI*). O índice foi desenvolvido por Herbst et al. (1966) e a sua aplicação em um sistema de monitoramento de seca é realizada através da comparação dos valores atuais de determinada característica com os correspondentes valores históricos (FREITAS, 1998). Para quantificar a duração, a severidade, o início e o fim de um período seco a ferramenta analisa uma série de dados de precipitação mensal (FERNANDES et al., 2009). O índice classifica como mês seco apenas aqueles meses em que o déficit de precipitação permanece acima do déficit médio daquele mês estudado, pois de acordo com FREITAS (1998) uma premissa básica desse método é que a agricultura praticada em uma determinada região é, de certa maneira, adaptada às condições climáticas vigentes na área. Embora o total precipitado em mês varie de ano a ano, supõe-se que as culturas típicas sejam ajustadas à variabilidade média da chuva.

Um dos índices que é mais utilizado para avaliar a seca é o Índice Padronizado de Precipitação (*Standardized Precipitation Index – SPI*), desenvolvido por McKee, Doesken e Kleist em 1993 na Universidade do Estado do Colorado, Estados Unidos. Os pesquisadores perceberam que um índice precisa ser simples, fácil de calcular e estatisticamente relevante e significativo (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2012). O SPI pode ser utilizado tanto nas estações secas quanto chuvosas, descrevendo condições de seca que são importantes para aplicações meteorológicas, hidrológicas e agrícolas (GUENANG & KAMGA, 2014).

O SPI baseia-se na padronização da precipitação, correspondendo ao desvio da precipitação em relação à média para um período de tempo específico, dividido pelo desvio padrão do período a que diz respeito, ou seja, representa o número de desvios padrão que o valor observado se desvia em relação à média, para uma variável aleatória normalmente distribuída (McKEE et al., 1993).

Inicialmente McKee et al. (1993) calcularam o índice utilizando períodos de 3, 6, 12, 24 e 48 meses. Este método utiliza apenas uma base de dados de precipitação, devido a esta metodologia versátil, permite que o SPI monitore o abastecimento de água a curto prazo, como a umidade do solo, importante para a produção agrícola e recursos hídricos, como suprimentos de água subterrânea, os níveis de lagos e reservatórios (HAYES et al., 1999).

Como o índice pode ser utilizado em diferentes escalas de tempo, as escalas menores, até 6 meses, permitem o monitoramento de secas meteorológicas e agrícolas, períodos entre 9 e 12 meses monitoram a seca hidrológica com a escassez de água refletida nos reservatórios superficiais, as maiores escalas quantificam os impactos das secas nos reservatórios de água subterrâneos (SANTOS & PORTELA, 2010).

Santos et al. (2013) utilizaram o SPI para caracterizar quantitativamente o fenômeno da seca hidrológica que ocorre para a bacia do alto São Francisco. O estudo calculou o índice para a escala de 7 meses, utilizando 49 séries pluviométricas referente ao período seco da região, o que possibilitou estabelecer limiares de precipitação capazes de caracterizar tanto períodos secos quanto períodos chuvosos na região referentes ao intervalo estudado.

O SPI foi utilizado por Sousa et al. (2016) na análise e identificação de eventos extremos de chuva e seca na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu (Bahia), onde foram utilizadas as escalas de tempo de 3, 6, 12 e 24 meses com a utilização de séries mensais históricas, no mínimo 25 anos de duração, de 73 estações pluviométricas. O índice identificou que a ocorrência de períodos de chuva extrema foi maior que a de períodos extremamente secos.

Um trabalho realizado por Blain & Brunini (2005) buscou analisar as condições climáticas do Estado de São Paulo, utilizando dois índices de seca, comparando os valores obtidos a parâmetros do balanço hídrico de treze distintas localidades. O estudo concluiu que o SPI foi capaz, através de diferentes escalas de tempo, quantificar e monitorar um déficit hídrico, seja de curta período (seca meteorológica) ou de longa duração (seca hidrológica ou socioeconômica). No Estado do Espírito Santo o SPI foi utilizado por Blain et al. (2010) para verificar a aplicação dessa variável no monitoramento das condições de seca meteorológica. O índice foi utilizado na escala mensal, onde foi observado que a principal característica das séries do SPI é sua grande variabilidade espaço-temporal, a qual indica que em uma mesma região meses extremamente secos podem ser precedidos e/ou seguidos de meses úmidos ou normais, e que distintos casos de seca podem ocorrer de forma aleatória, entre as localidades e em um mesmo período.

Teixeira et al. (2013) fizeram o uso de índices de seca para quantificar a intensidade da seca que ocorria no município de Bagé-RS, local onde o déficit hídrico é o principal fator responsável por perdas na lavoura de culturas de verão. Assim o Índice Padronizado de Precipitação foi calculado para a escala temporal de 1 mês, utilizando dados históricos de uma estação pluviométrica, onde 6,8% (79) dos 1164 meses analisados quanto aos valores de SPI foram classificados como eventos em que ocorreram secas severas e extremas.

Fernandes et al. (2010) utilizaram quatro índices quantitativos de seca para avaliar a intensidade e a ocorrência de seca, e a relação entre tais índices e a estimativa da produtividade arroz de sequeiro em Santo Antônio de Goiás. Com relação ao SPI, foi verificado que, na escala mensal, o índice apresentou maior número de eventos extremos de seca do que outros índices como o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e o Z de Palmer (Z-index). Nos períodos com variações da produtividade ajustada maior que  $300 \text{ kg ha}^{-1}$ , o SPI apresentou 67 % de acerto, valor esse inferior aos outros índices estudados.

Para estimar a variação da produtividade do arroz de terras altas Fernandes e Heinemann (2011), utilizaram o SPI em diferentes escalas para diferentes microrregiões do Estado de Goiás, onde verificaram que com o aumento da escala temporal do SPI possibilitou a identificação de eventos de seca de maior duração, onde a escala anual foi a que melhor

apresentou o desempenho na estimativa da variação da produtividade ajustada de arroz de terras altas.

### 2.3. Soja e a seca

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma planta originária da Ásia, da família das leguminosas, sua domesticação ocorreu há cerca de 4500–4800 anos, onde seu cultivo tinha como finalidade a alimentação humana. A cultura foi difundida inicialmente em 1739 na Europa, chegando no continente americano em 1765, através dos Estados Unidos (MUNDSTOCK & THOMAS, 2005). No Brasil a soja estabeleceu-se como cultura de grande importância econômica em 1969, quando superou um milhão de toneladas. Até então, praticamente toda a produção brasileira da oleaginosa era concentrada nos estados da Região Sul. A partir da década de 1980, houve a expansão da produção para a Região Centro-Oeste (MONTEIRO, 2009).

A cultura soja tornou-se um dos cultivos mais importantes nas últimas décadas, desempenhando um papel-chave na segurança alimentar mundial. Com a soja se produz mais proteína por hectare do que qualquer outro grande cultivo (CARNEIRO FILHO & COSTA, 2016). A soja é uma importante fonte de divisas para o Brasil, contribuindo com parcela significativa nas exportações brasileiras. No levantamento feito em de agosto pela CONAB (2019b) a oleaginosa apresentou crescimento na área plantada de 2,1% em relação à safra passada, correspondendo ao plantio de 35,87 milhões de hectares. A produção nacional atingiu 115,07 milhões de toneladas, constituindo-se a segunda maior safra da série histórica da CONAB.

A planta de soja é uma dicotiledônia, seu desenvolvimento é dividido em dois agrupamentos, propostos por Fehr & Caviness (1977). A descrição da fenologia é importante pois, conhecendo-se como a planta cresce e se desenvolve, diminuem os efeitos negativos provocados pela variação dos elementos meteorológicos, porque as condições proporcionadas por eles dependem da região, tipo de solo, da época de semeadura e do ciclo da cultura. De acordo com Monteiro (2009) “a descrição dos estádios de desenvolvimento de Fehr & Caviness (1977) é a mais utilizada no mundo, por apresentar uma terminologia única, objetiva, precisa e universal, capaz de descrever um único indivíduo, ou uma lavoura inteira, de qualquer cultivar”.

Os estádios fenológicos da soja são divididos em vegetativo, da fase de emergência até a última folha trifoliada completamente desenvolvida, e reprodutivo, do florescimento até a maturação fisiológica. As fases vegetativas, são iniciadas com a letra V, as fases reprodutivas, são iniciadas com a pela letra R. O início do desenvolvimento da planta após a semeadura, quando a plântula emerge do solo e seus cotilédones se encontram acima do solo, formando um ângulo de 90°, ou maior, com seus respectivos hipocótilos, este estágio é denominado VE (MONTEIRO, 2009).

A soja é uma cultura que melhor se adapta a temperaturas do ar variando entre 20 °C e 30 °C, sendo que a temperatura ideal para seu crescimento e desenvolvimento está em torno de 30 °C. O crescimento vegetativo da soja é pequeno ou nulo a temperaturas inferiores a 10 °C. Temperaturas maiores que 40 °C têm efeito adverso na taxa de crescimento, provocam distúrbios na floração e diminuem a capacidade de retenção de vagens. Esses problemas se agravam com a ocorrência de déficits hídricos (EMBRAPA, 2013).

A principal limitação da expressão potencial de rendimento da cultura é devido à má disponibilidade de hídrica, sendo o maior fator contribuinte na variabilidade dos rendimentos de grãos, observados de um ano para outro, mesmo o país possuindo um amplo conhecimento sobre o cultivo da soja (MONTEIRO, 2009).

Os períodos que mais sofrem com a ausência de água são de germinação-emergência e floração-enchimento de grãos (MUNDSTOCK & THOMAS, 2005; FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007; MONTEIRO, 2009;). Na fase de germinação, a semente de soja necessita de 50% de seu peso em água para garantir uma boa germinação. Conforme o desenvolvimento da planta a necessidade de água aumenta, onde atinge seu ponto máximo na fase reprodutiva, durante a floração e enchimento de grãos (7-8 mm/dia), após esse período ocorre um decréscimo (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Grandes estresses hídricos na fase de floração e enchimento de grãos, provocam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático e o enrolamento de folhas e, como consequência, causam a queda prematura de folhas e de flores e abortamento de vagens, resultando, por fim, em redução do rendimento de grãos (EMBRAPA, 2013; FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007; FARIAS et al., 2001; THOMAS & COSTA, 1994). Para um bom desempenho da cultura, é necessária uma boa distribuição pluviométrica durante tudo o ciclo da soja, satisfazendo suas necessidades, principalmente durante os estádios mais críticos (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

É importante ressaltar que a ausência de precipitação pluviométrica, não significa que ocorrerá o déficit hídrico. A planta busca um ajuste entre a absorção de água e a transpiração. O limite para este arranjo representa o déficit hídrico (NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Apesar de eficazes, os sistemas de irrigação para suplementar as necessidades de água das plantas, possuem um elevado custo, dificultando o acesso à tecnologia por parte dos produtores (MONTEIRO, 2009).

As secas que se estendem por longos períodos, prejudicam a atividade fotossintética das plantas de soja, pois ocorre o fechamento dos estômatos, diminui a assimilação de CO<sub>2</sub> e assim reduz a absorção de fotoassimilados (MUNDSTOCK & THOMAS, 2005; FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

O estresse hídrico pode reduzir a taxa de acúmulo de matéria seca nos grãos(g/planta/d), acelerar o tempo de maturação, fazendo com que os grãos produzidos sob seca sejam menores. O estresse causado por deficiência hídrica afeta o crescimento da planta pois determina a presença de plantas pouco desenvolvidas, de pequeno porte, reduz a área foliar com entrenós pequenos. Os tecidos vegetais apresentam-se com aspecto de murchos e os folíolos tendem a diminuir a sua abertura para diminuir a área foliar exposta (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

Os efeitos da deficiência hídrica sobre o rendimento da cultura vão depender da intensidade, duração, época de ocorrência e interação com outros fatores determinantes do rendimento de grãos. O déficit hídrico tem influência principalmente, sobre processos como fotossíntese, respiração, crescimento, absorção e transporte de nutrientes, além de provocar modificações

enzimáticas e alterações hormonais que afetam outros processos na planta (CUNHA et al., 2001; FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

Na atual agricultura globalizada, incrementos nos rendimentos e redução dos custos e dos riscos de insucesso passaram a ser exigências básicas para a competição no mercado agrícola. Problemas das mais variadas ordens podem surgir e, normalmente, surgem durante a safra. Quando se trata de atividade econômica com margens de lucro tão estreitas, como ocorre com a atual sojicultura praticada no Brasil, não há espaços para riscos, por mais insignificantes que pareçam. De todos os fatores que afetam a produção, o clima aparece como aquele de mais difícil controle e maior ação sobre a limitação (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).



### 3. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi fazer um estudo sobre o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais, e avaliar sua relação com a produtividade da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill), no Distrito Federal e em diferentes localidades do Estado de Goiás.

Os objetivos específicos foram:

- a) Caracterizar as secas para o Distrito Federal e diferentes municípios do Estado de Goiás, com base no cálculo do Índice Padronizado de Precipitação, utilizando séries históricas de dados pluviométricos;
- b) Analisar da frequência dos valores de SPI, para quantificar a persistência dos eventos climáticos que ocorrem nas regiões estudadas.
- c) Caracterizar a relação dos valores de SPI com a série histórica da produtividade de soja, para estimar a influência dos eventos climáticos no desenvolvimento da cultura.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Dados utilizados

Para este trabalho foram utilizadas séries históricas de dados diários de precipitação pluvial de estações convencionais do Distrito Federal e do Estado de Goiás, obtidas junto ao Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Para o cálculo do SPI, McKee et al. (1993) recomendam a utilização de utilização de séries temporais com no mínimo 30 anos de dados, logo, para o presente estudo foram utilizados dados de precipitação que compreendem o período de 1984 a 2018 (34 anos).

Foram estudadas as séries históricas de precipitação de 11 localidades do Estado de Goiás, além de Brasília (Tabela 1). Para este estudo, foram inicialmente selecionadas as estações meteorológicas que possuem mais do que 90% do número total de dados esperados para o período, conforme proposto pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2012).

**Tabela 1.** Relação de estações inicialmente selecionadas, número de dados ausentes, e porcentagem em relação ao total de dados das séries temporais de precipitação das estações convencionais do INMET (<http://www.inmet.gov.br/>).

<b>Estação</b>	<b>Número de Dados Ausentes</b>	<b>Porcentagem de Dados Ausentes</b>
Aragarças	327	2,6
Catalão	805	6,3
Formosa	11	0,1
Goiânia	15	0,1
Goiás	691	5,4
Ipameri	502	3,9
Itumbiara	6235	89,8
Jataí	140	1,1
Pirenópolis	219	1,7
Posse	165	1,3
Rio Verde	3611	28,2
Brasília	23	0,2

As séries históricas de produtividade da cultura da soja utilizadas também foram obtidas para o período de 1984 a 2018, provenientes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), disponíveis na base de dados do Sistema IBGE de recuperação automática (SIDRA). Da mesma forma, algumas localidades não apresentaram informações completas de produtividade, sendo, portanto, excluídas do estudo. As estações selecionadas para este estudo, com suas coordenadas geográficas, são apresentadas na Tabela 2, e sua localização é apresentada na Figura 2.

**Tabela 2.** Coordenadas geográficas das estações convencionais utilizadas neste trabalho.

Estação	Identificação da estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Brasília	83377	-15,78	-47,92	1159,54
Catalão	83526	-18,18	-47,95	840,47
Formosa	83379	-15,54	-47,33	935,19
Ipameri	83522	-17,71	-48,16	772,99
Pirenópolis	83376	-15,85	-48,96	740,00

**Figura 2.** Localização geográfica das estações meteorológicas utilizadas neste estudo.

#### 4.2. Cálculo do SPI

Os valores do índice de padronizado de precipitação (SPI) são baseados no registro de longo prazo de precipitação ajustado a uma distribuição de probabilidade (EDWARDS & MCKEE, 1997). Os dados de precipitação originais são transformados para uma distribuição normal, que prontamente permite a comparação entre localizações distintas e a computação analítica das probabilidades de excedência (KEYANTASH & DRACUP, 2002).

Para se obter bons resultados é necessário utilizar uma base de dados de precipitação mínima de 30 anos. Os dados coletados são ajustados por meio de uma distribuição gama, definida pela função de densidade de probabilidade, obtida por meio da equação 1 (FERNANDES et al., 2009):

$$g(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Equação 1

sendo:  $\alpha > 0$  = parâmetro de forma (adimensional);  $\beta > 0$  = parâmetro de escala (mm);  $\chi > 0$  = total de precipitação (mm);  $T(\alpha)$  = função gama.

A função gama é calculada por meio da equação 2:

$$T(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad \text{Equação 2}$$

Utilizando o método da máxima verossimilhança é possível estimar os parâmetros de forma  $\alpha$  e  $\beta$ , conforme mostrado nas equações a seguir (GUEDES; MACEDO; SOUSA, 2012):

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad \text{Equação 3}$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad \text{Equação 4}$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x) \quad \text{Equação 5}$$

sendo:  $\bar{x}$  = média aritmética da precipitação pluvial (mm); N = número de observações de precipitação.

A partir dos resultados obtidos dos parâmetros de forma e escala encontra-se a probabilidade cumulativa (Equação 6) de um evento de precipitação observado para uma escala de tempo mensal (FERNANDES et al., 2009).

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha T(\alpha)} \int_0^x X^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad \text{Equação 6}$$

Substituindo o  $t = \frac{x}{\beta}$ , a equação acima se transforma na função gama incompleta (FERNANDES et. al., 2009), definida pela equação 7:

$$G(x) = \frac{1}{T(\alpha)} \int_0^X t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad \text{Equação 7}$$

Como uma precipitação cumulativa poder conter zeros, a função gama pode ser indeterminada para  $x = 0$  (FERNANDES et. al., 2009), assim a probabilidade cumulativa toma o seguinte aspecto:

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \quad \text{Equação 8}$$

sendo: H (x) = distribuição de probabilidade cumulativa; q = probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros); G (x) = distribuição cumulativa teórica.

A equação 8 é então transformada em uma variável aleatória normalizada (Z), com sua média com valor zero e variância unitária. Esta variável corresponderá ao valor do Índice Padronizado de Precipitação (SPI). Essa transformação equiprobabilística foi uma definida por Panofsky e Brier (1958, apud FERNANDES et al., 2009) como uma característica essencial para transformar uma variável de distribuição gama para uma variável com uma distribuição

normal, onde a probabilidade de ser menor que um valor dado será igual à probabilidade de ser menor que o valor correspondente da variável transformada. Os valores de precipitação utilizados nas probabilidades cumulativas empíricas são dispostos em uma amostra, dada pela equação 9 e os dados são ordenados em de acordo com a magnitude, do menor para o maior, de forma que os valores são baixos.

$$q = \frac{m}{n+1} \quad \text{Equação 9}$$

sendo:  $m$  = número de ordem dos valores de zero em uma série climatológica;  $n$  = tamanho da amostra.

Para não representar diversos gráficos para cada região e em todas as escalas temporais possíveis e para cada mês do ano, o valor de ( $Z$ ) ou SPI é alcançado de maneira mais fácil pelo aproximação matemática desenvolvida por Abramowitz e Stegun (1965, apud FERNANDES et al., 2009), que converte a probabilidade cumulativa em uma distribuição normal a variável ( $Z$ ).

Em que  $Z$  é obtido pelas equações 10 e 11:

$$Z = SPI = - \left( t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad \text{Equação 10}$$

$$Z = SPI = + \left( t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1 \quad \text{Equação 11}$$

Sendo:  $C_0 = 2,515517$ ;  $C_1 = 0,802853$ ;  $C_2 = 0,010328$ ;  $d_1 = 1,432788$ ;  $d_2 = 0,189269$ ;  $d_3 = 0,001308$ .

A variável  $t$  é definida pelas equações 12 e 13;

$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(H(x))^2} \right]} \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad \text{Equação 12}$$

$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{1 - (H(x))^2} \right]} \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1 \quad \text{Equação 13}$$

Conceitualmente, o SPI é representado pelo o z-score, o que significa que o número de desvios padrão acima e abaixo do qual um evento se encontra em relação à média. (FERNANDES et al., 2009).

A classificação dos valores de SPI calculados é feita com base nos limites indicados na Tabela 3. Os valores positivos de SPI mostram a precipitação maior do que a média e os valores negativos indicam precipitações menores que a média. A seca ocorre sempre que o valor do SPI é constantemente negativo. Esse método tem a grande vantagem de padronizar a análise, permitindo comparar regiões totalmente distintas, como por exemplo regiões com climas mais úmidos e chuvosos com regiões mais áridas e secas (FERNANDES et al., 2009).

**Tabela 3.** Classificação do Índice de Precipitação Padronizada – SPI (adaptado de WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2012).

SPI	Classificação
$\geq 2.00$	Extremamente úmido
+1.5 até 1.9	Muito úmido
1.0 até 1.4	Moderadamente úmido
-0.9 até 0.9	Próximo ao normal
-1.0 até -1.4	Moderadamente Seco
-1.5 até -1.9	Muito Seco
$\leq -2.00$	Extremamente Seco

Para este estudo, o cálculo do SPI foi feito utilizando o programa *SPI Generator*, criado pelo *National Drought Mitigation Center* (NDMC) da Universidade de Nebraska, EUA, disponível em < <https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx> > (Acesso em: jul, 2019). Com o *SPI Generator* é possível calcular o SPI a partir de dados de entrada diários, semanais ou mensais de precipitação; opcionalmente o programa ainda calcula a frequência e os períodos em que ocorreram a seca.

**Figura 3.** Página inicial do programa *SPI Generator* (adaptado de NDMC, 2018).

O programa utilizado requer dados de entrada completos e para isso foi necessário preencher os dias que, por alguma razão, a verificação desses dados não foi realizada, com o marcador -99, significando dado nulo. Após preencher todas as lacunas, e gerados os arquivos no formato requerido pelo programa, foram gerados valores de SPI para quatro escalas temporais: SPI-1 (mensal), SPI-3 (trimestral), SPI-6 (semestral), SPI-12 (anual); e as frequências da ocorrência desses valores. Os valores obtidos no cálculo do SPI para as diferentes escalas temporais foram analisados pela frequência de ocorrência de eventos de seca, classificados conforme a Tabela 3, para as diferentes regiões estudadas.

### 4.3. Ajuste dos dados de produtividade

Os valores de produtividade de soja obtidos refletem os efeitos do fator climático e do avanço da tecnologia ao longo do tempo. Com o objetivo de reduzir os efeitos do desenvolvimento tecnológico, os dados originais da série histórica de rendimento de grãos de soja foram ajustados, tomando como referência a produtividade de 2018 (último ano da sequência). Para tanto, foram submetidos a uma análise de regressão linear simples, em que o ano foi considerado como variável independente, e o rendimento médio anual de grãos de soja como variável dependente. A partir da equação de regressão ajustada aos dados, procedeu-se à retirada da tendência tecnológica incorporada às séries históricas, pela sequência de equações apresentadas abaixo.

Primeiramente, os desvios relativos da regressão, que representam as variações climáticas, foram calculados pela equação (FERNANDES et al., 2010):

$$RD_i^n = \frac{(x - \bar{y})}{\bar{y}} \quad \text{Equação 14}$$

Onde: RD = desvio relativo; i = ano observado; n = ano de referência; x = produtividade observada (kg ha<sup>-1</sup>);  $\bar{y}$  = produtividade estimada (kg ha<sup>-1</sup>) pela regressão.

O ajuste dos dados de produtividade para o ano de 2018 foi calculado com base na equação:

$$AY_i^n = (RD_i^n + 1) \bar{Y} \quad \text{Equação 15}$$

Em que: AY = produtividade ajustada (kg ha<sup>-1</sup>);  $\bar{Y}$  = produtividade estimada (kg ha<sup>-1</sup>) pela regressão para o ano de 2018. Deve-se adicionar 1 ao RD, pois seus valores são sempre menores que 1.

### 4.4. Análise da relação entre SPI e produtividade da soja

A análise da relação entre os valores obtidos de SPI nas diferentes escalas temporais e a série histórica de produtividade ajustada da soja foi feita comparando valores de SPI relacionados aos mesmos períodos, de outubro a abril, que representam o principal período de crescimento e desenvolvimento da cultura de soja no Distrito Federal e no Estado de Goiás.

Para a escala temporal mensal, os valores obtidos foram acumulados por seis meses (outubro a março, e novembro a abril), e os índices acumulados resultantes para esses períodos foram denominados de  $SPI-1ac_{out-mar}$  e  $SPI-1ac_{nov-abr}$ . Na escala semestral calculada, foram utilizados os valores correspondentes ao semestre que termina em março ou abril,  $SPI-6_{out-mar}$  e  $SPI-6_{nov-abr}$  respectivamente. Para a escala anual,  $SPI-12_{jul-jun}$ , foi avaliado o SPI do ano-safra, iniciado em julho de cada ano.

A análise do comportamento da produtividade ajustada em relação aos períodos secos ou úmidos indicados pelos valores de SPI, foi seguida a metodologia apresentada por Fernandes et al. (2010) com algumas adaptações. Os valores produtividade ajustada foram classificados em dois grupos: período com produtividade menor ou igual ao ano anterior; e com produtividade maior que o ano anterior. Assim, para o cálculo do número de acertos dos valores de SPI acumulados, usou-se uma tabela de contingência com as seguintes restrições: acerto (Ac), a coincidência de um período seco com a queda de produtividade; erro (Er) um período seco e ausência de queda da produtividade; negativo errado (NE), um período úmido e a redução da produtividade; e negativo correto (NC) um período úmido e a ausência de diminuição da produtividade. O número de acertos (Pr) foi calculado conforme a equação abaixo:

$$Pr = \frac{Ac + NC}{NT} \quad \text{Equação 16}$$

Onde NT é o número total de amostras para cada localidade estudada.

**Tabela 4.** Critérios para cálculo do percentual de acerto dos valores obtidos pelo SPI em relação à estimativa da variação na produtividade ajustada da soja.

Classificação	Período	Produtividade da soja
Ac	Seco	↓ Produtividade
Er	Seco	↑ Produtividade
NE	Úmido	↓Produtividade
NC	Úmido	↑Produtividade

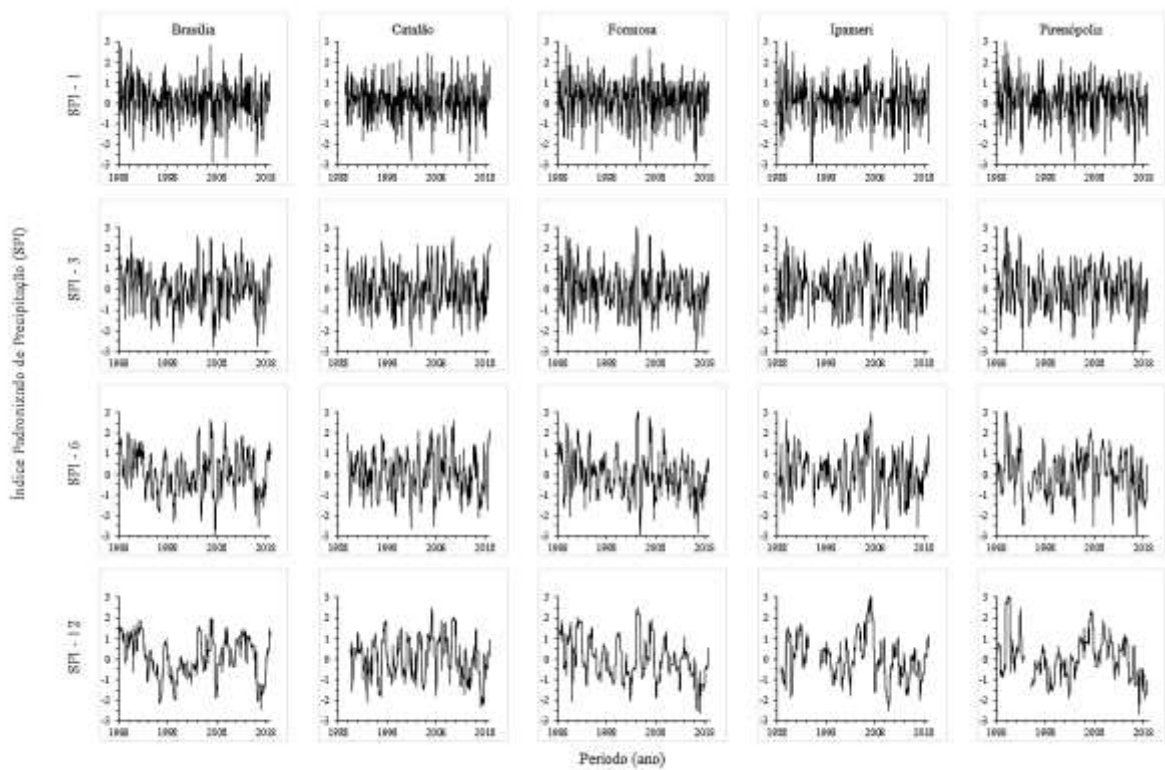


## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Série temporal dos valores de SPI

Na análise da evolução da série temporal dos valores de SPI foram identificados diversos eventos de seca para todas as cinco regiões estudadas, como apresentado na Figura 4. O Índice Padronizado de Precipitação mensal apresentou maior quantidade de eventos climáticos, devido à sua mais alta frequência temporal. Conforme o aumento da escala temporal houve diminuição do número de eventos e da frequência temporal, em razão do índice se comportar como uma média móvel que possui a sua ordem (k) aumentada (LLOYD-HUGHES & SAUNDERS, 2002).

**Figura 4.** Série temporal do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), em diferentes escalas temporais, nas cinco localidades analisadas: SPI-1 – escala mensal; SPI-3 – escala trimestral; SPI-6 – escala semestral; SPI-12 – escala anual.



A quantidade de eventos de seca, ou seja, mais distantes da precipitação normal, observada nas escalas temporais anuais e semestrais são menores que a das escalas mensal e trimestral. Isso ocorre pois em escalas menores o SPI quantifica os eventos que possuem uma rápida resposta às anomalias de precipitação, e em escalas maiores o SPI calcula os eventos que são mais persistentes, correspondentes as anomalias de chuvas que ocorrem a longo prazo. Resultados parecidos foram encontrados por Fernandes & Heinemann (2011).

## 5.2. Frequência de ocorrência do SPI

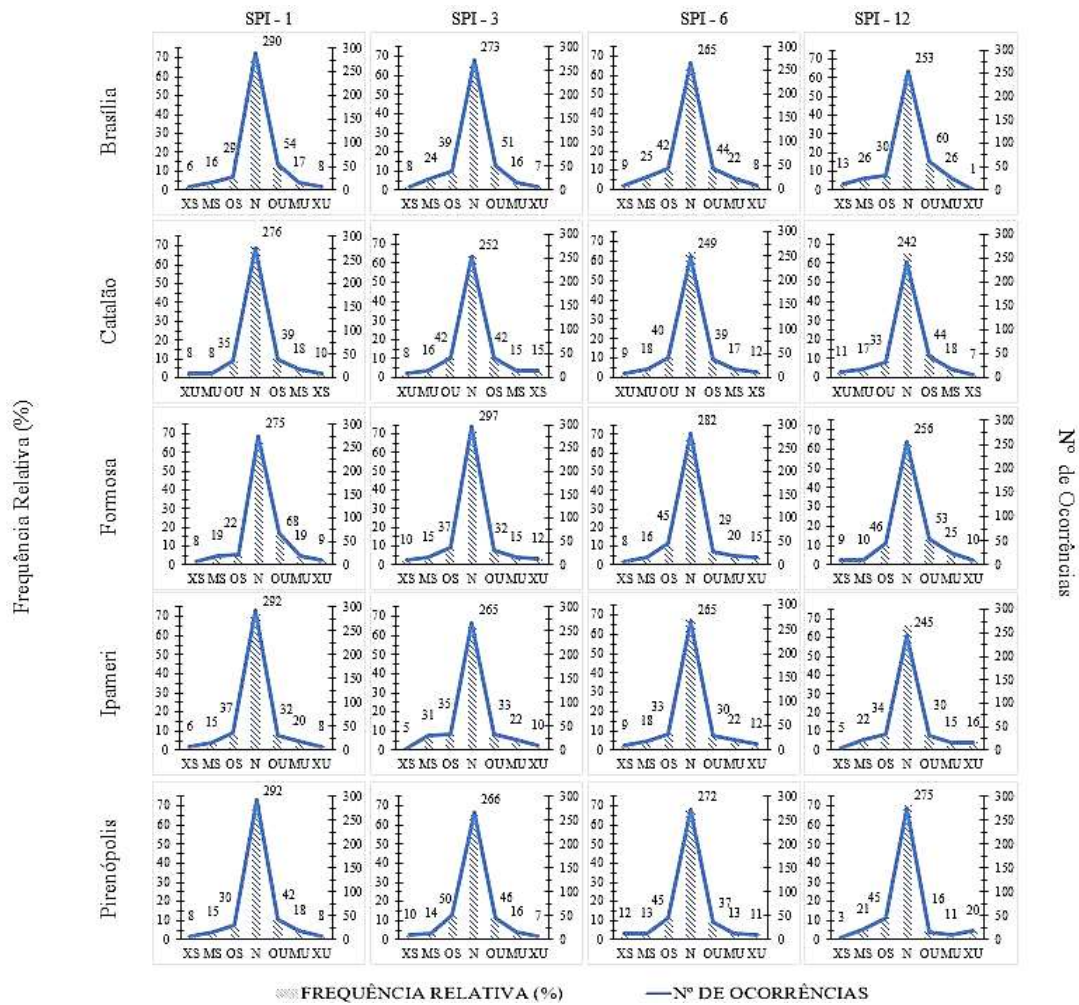
Analisando a frequência relativa dos valores de SPI, constatou-se que a maior porcentagem dos valores se encontrou próximo ao valor normal para as diferentes escalas. Esses valores já eram esperados, tendo em vista que o índice apresenta distribuição normalizada. As regiões de Brasília e Formosa apresentaram os maiores números totais de valores de SPI calculados, já que suas séries temporais de precipitação estavam mais completas.

O Índice Padronizado de Precipitação identificou, para todas as regiões, a ocorrência de eventos extremos, por todas as escalas temporais de SPI utilizadas. Brasília foi a região que apresentou maior ocorrência de valores de SPI-12 classificados como extremamente secos (13) e Pirenópolis foi avaliado maior número de eventos classificados como úmidos (20), observados na escala anual. Os valores obtidos para as escalas mensal e trimestral apresentaram menor variação quando comparados.

As variações que ocorreram se apresentaram semelhantes para as diferentes escalas estudadas. As probabilidades de ocorrência de períodos extremamente secos variaram de 1 a 3% para as regiões de Catalão, Formosa e Ipameri independente da escala.

A porcentagem de períodos classificados como úmidos foi superior a porcentagem de períodos classificados como secos para Brasília, Catalão e Formosa. Para os municípios de Ipameri e Pirenópolis os eventos climáticos classificados como secos foram superiores ou iguais a quantidade de eventos úmidos.

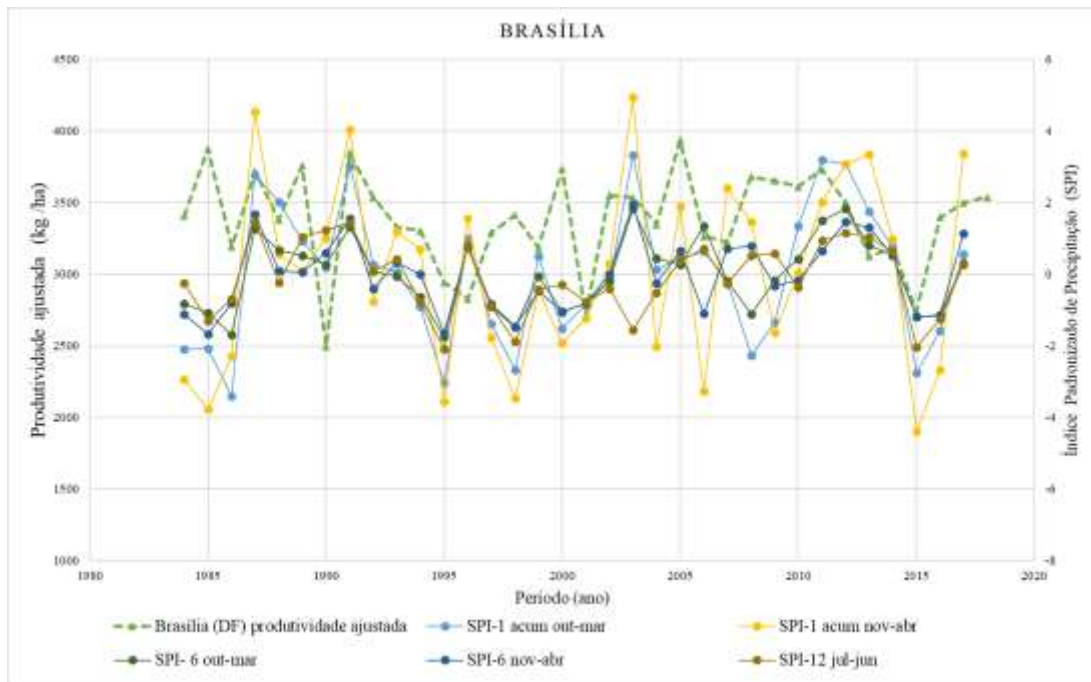
**Figura 5.** Frequência relativa e número de ocorrências dos valores do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), em diferentes escalas temporais, nas cinco localidades analisadas: SPI-1 – escala mensal; SPI-3 – escala trimestral; SPI-6 – escala semestral; SPI-12 – escala anual. XS: extremamente seco; MS: muito seco; OS: moderadamente seco; N: próximo ao normal; OU: moderadamente úmido; MU: muito úmido; XU: extremamente úmido.



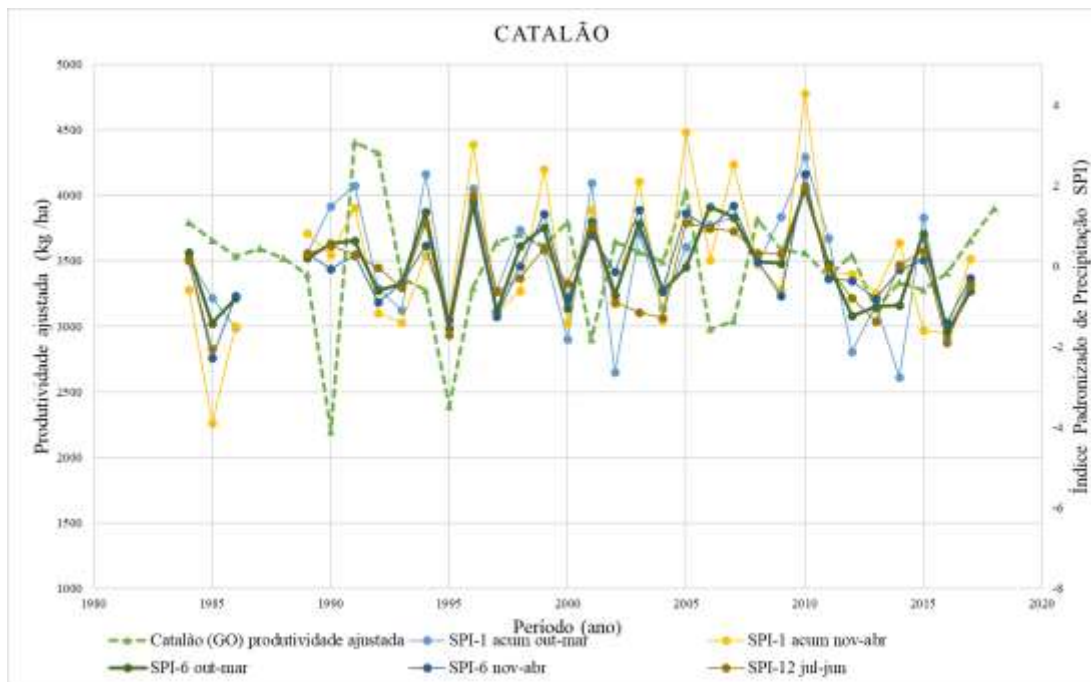
### 5.3. Produtividade de soja ajustada e SPI

Os valores de produtividade de soja ajustada e os valores obtidos de SPI nas diferentes escalas temporais para as diferentes localidades estudadas são apresentados nas Figuras 6 a 10.

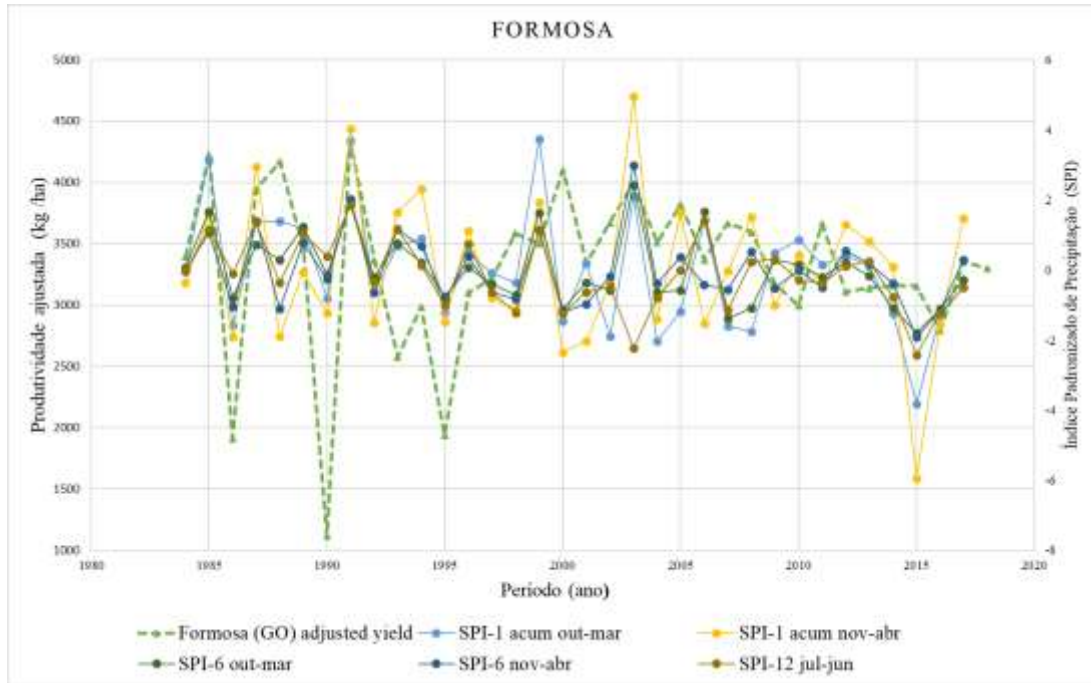
**Figura 6.** Produtividade de soja ajustada e Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais – Brasília, DF.



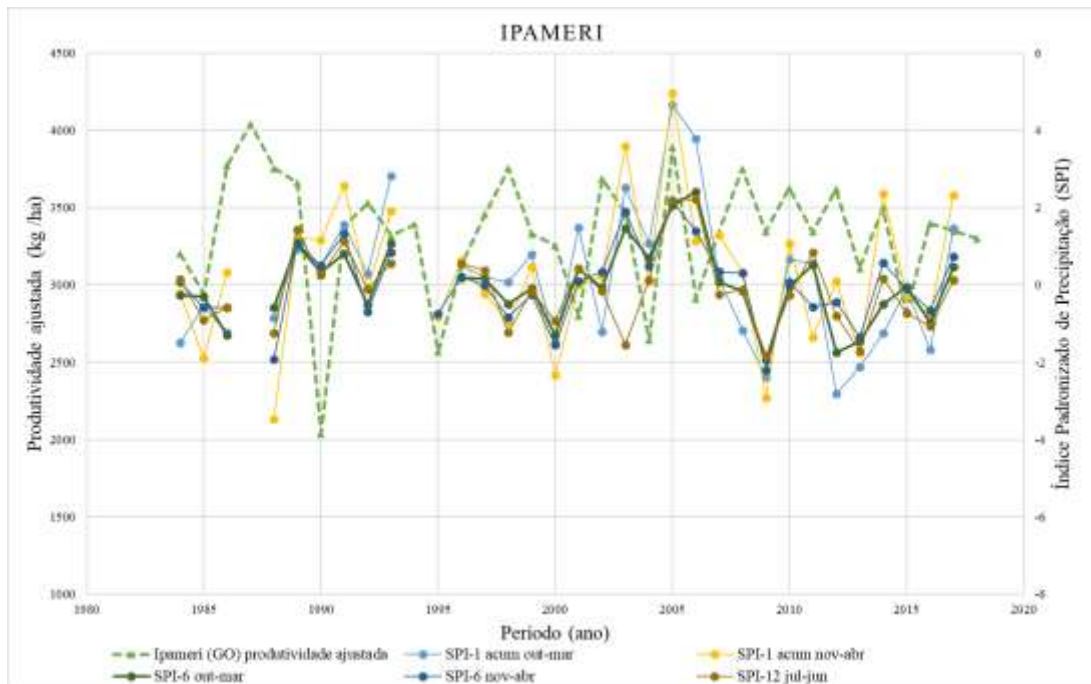
**Figura 7.** Produtividade de soja ajustada e Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais – Catalão, GO.



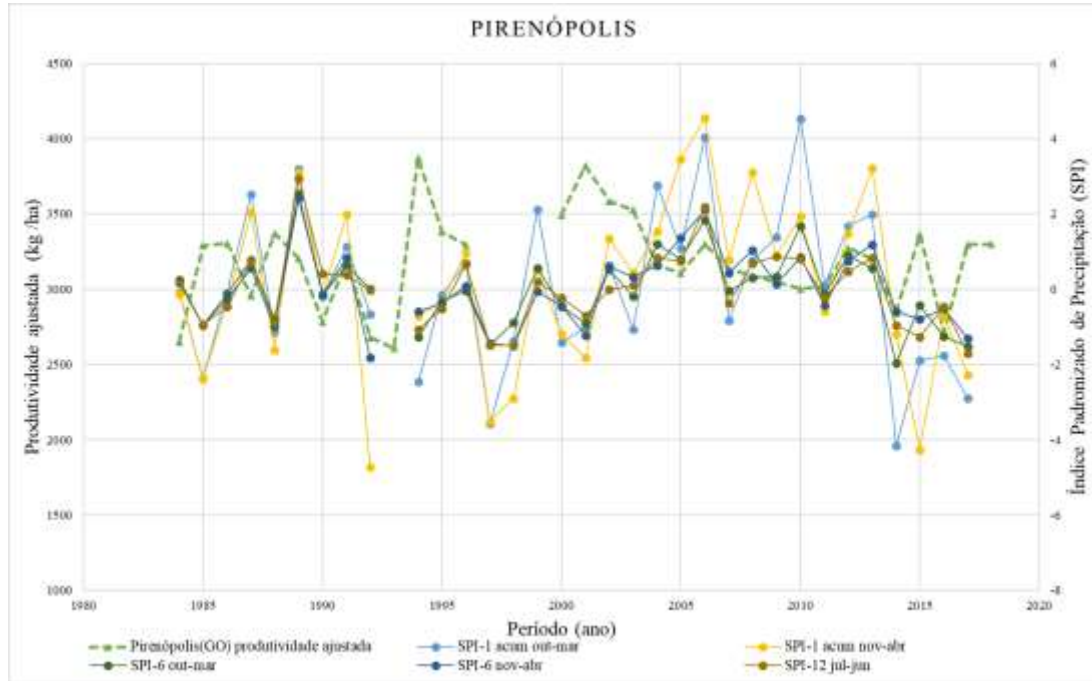
**Figura 8.** Produtividade de soja ajustada e Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais – Formosa, GO.



**Figura 9.** Produtividade de soja ajustada e Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais – Ipameri, GO.



**Figura 10.** Produtividade de soja ajustada e Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em diferentes escalas temporais – Pirenópolis, GO.



Foi observada uma diminuição de produtividade no ano de 1990 para todas as regiões estudadas. O mesmo foi verificado Mariano; Santos & Scopel (2006) em toda a região do Sudoeste de Goiás, onde a deficiência hídrica, nos meses de dezembro e janeiro e o excesso hídrico em fevereiro prejudicaram os rendimentos da soja, principalmente no ano-safra de 1989/1990, classificado como tendente a chuvoso. Este foi o ano que apresentou maior perda na produtividade, em média de 486 kg/ha, embora esta região apresentando alto potencial tecnológico. Na região Sul do país, a relação entre a variabilidade climática e o rendimento médio de grãos fica evidenciado, onde na safra de 1990/1991 o rendimento médio foi de 712 kg/ha, um dos mais baixos da história no Estado do Rio Grande do Sul, ocasionado por uma seca na região, principalmente no período de final de dezembro a março, coincidindo com todo o período da floração e uma grande parte do período de enchimento de grãos de soja (BERLATO & FONTANA, 2001).

Para os municípios de Formosa, Pirenópolis e a região de Brasília o SPI-1ac<sub>nov-abr</sub> identificou a ocorrência de uma seca extrema no ano de 2015. Neste ano, o mês de janeiro foi marcado por um veranico em parte da região Centro-Oeste, com duração entre 15 e 20 dias, resultando em temperaturas elevadas que ultrapassaram em mais de 4°C a média da temperatura máxima do mês e um acumulado mensal de precipitação bem abaixo, com desvios negativos da ordem de mais de 100 mm (CONAB, 2015a).

De acordo com a Figura 6, em Brasília, houve grande queda da produtividade da soja em três momentos, para o ano de 1990, 2001 e 2015 que correspondem às safras 1989/1990, 2000/2001 e 2014/2015. De acordo com a CONAB (2015b), o desempenho da produção de



soja, safra 2014/2015, no Distrito Federal apresentou reduções, tanto na área plantada quanto nos níveis de produtividade, duramente afetada pelas adversidades do clima. O índice SPI identificou períodos de seca, para todas as escalas utilizada, conforme observado na Figura 6.

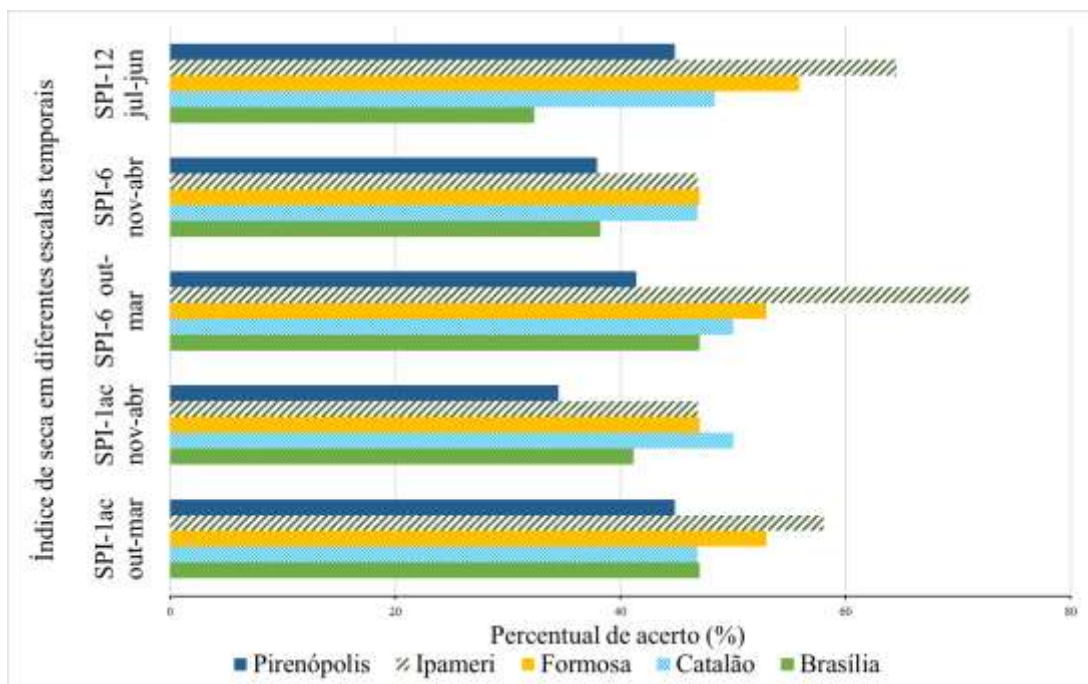
Catalão teve sua produtividade de soja diminuída na safra 1989/1990 e 1994/1995, onde o valor da produtividade ajustada ficou abaixo de 2500 kg/ha como mostra a

Figura 7. De acordo com Vieira (2002), foi observada uma queda de 18,5% da área plantada soja em 1996 em relação a 1995, no Estado de Goiás. O mesmo comportamento foi observado para o município de Formosa, de acordo com a Figura 8.

As menores produtividades ajustadas para Ipameri foram observadas também nos anos-safras de 1989/1990 e 1994/1995 (Figura 9), porém com menor variação entre os anos. Pirenópolis apresentou baixa variação no rendimento médio da cultura, a produtividade se manteve razoavelmente estável durante os anos observados (Figura 10).

A comparação do comportamento das séries temporais de produtividade ajustada da cultura com os valores obtidos de SPI calculado nas diferentes escalas temporais, permitiu a análise do desempenho dessas escalas em refletir a variação (diminuição ou aumento) no rendimento médio ajustado da soja (Figura 11). A queda de produtividade ajustada, em relação ao ano anterior, ocorreu em 19 anos, para a região de Brasília e o município de Catalão; em 18 anos, em Ipameri e Pirenópolis; e em 17 anos, para o município de Formosa.

**Figura 11.** Percentual de acerto na variação de produtividade ajustada de soja, em Brasília e nos municípios do Estado de Goiás, de acordo com o uso do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) nas escalas: SPI-1a<sub>out-mar</sub>, SPI-1a<sub>nov-abr</sub>, SPI-6<sub>out-mar</sub>, SPI-6<sub>nov-abr</sub>, e SPI-12<sub>jul-jun</sub>.



Os valores de SPI para Brasília indicaram um percentual médio de 41% de acerto na estimativa da variação de produtividade da soja, onde o SPI-1<sub>ac<sub>out-mar</sub></sub> e SPI-6<sub>out-mar</sub> apresentaram o maior valor de acerto, 47,1%.

Catalão apresentou o terceiro maior percentual de acerto dos valores de SPI comparados com a produtividade ajustada, como mostra a Figura 11 e o maior percentual de acerto observado foi para as escalas SPI-1<sub>ac<sub>nov-abr</sub></sub> e SPI-6<sub>out-mar</sub> com 50% de acerto.

Para o município de Formosa, a escala SPI-12<sub>jul-jun</sub> apresentou maior acerto, cerca de 55% dos valores de SPI refletiu corretamente a variação da produtividade de soja para os anos observados. A região foi a segunda que melhor estimou o rendimento da cultura.

Ipameri apresentou o melhor desempenho na estimativa da variação da produtividade de soja, apresentando uma média de acerto de 57%. A Figura 11 mostra que escala SPI-6<sub>out-mar</sub>, para este município apresentou o maior percentual, com 71% de acerto. Isso se deve ao fato de que as condições de umidade do solo respondem a anomalias de precipitação em uma escala de tempo relativamente curta. Anomalias de precipitação a longo prazo refletem em águas subterrâneas, no fluxo e no armazenamento de reservatórios hídricos (FERNANDES et al., 2009). Por isso é recomendada a utilização de escalas menores para monitoramento da seca agrícola.

Os valores de SPI para Pirenópolis obtiveram os menores índices de acerto ao estimar a variação da produtividade de soja, uma média de 40,6% de acerto dos valores. As escalas de SPI-1<sub>ac<sub>out-mar</sub></sub> e SPI-12<sub>jul-jun</sub> foram as que melhor estimaram a variação da produtividade ajustada de soja para o município, cerca de 44,8%.

A escala temporal que apresentou o melhor desempenho em estimar a variação na produtividade ajustada foi o Índice Padronizado de Precipitação semestral (SPI-6<sub>out-mar</sub>), com índice de acerto médio de 52 %, seguido do SPI-1<sub>ac<sub>out-mar</sub></sub> e SPI-12<sub>jul-jun</sub>, correspondente ao ano agrícola, com valores iguais ou superiores a 44% para todas as regiões estudadas.

A acumulação feita para os meses de novembro a abril apresentou menor percentual de acerto dos valores de SPI para este período, a provável razão do baixo desempenho é o fato do desenvolvimento da soja, nas regiões estudadas, ocorrer mais frequentemente no período de outubro a março.



## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

1. O Índice Padronizado de Precipitação (SPI) foi capaz de identificar períodos de extrema seca para todas as regiões estudadas. Com aumento da escala temporal ocorre a diminuição do número de eventos identificados pelo SPI.
2. A região de Brasília obteve maior frequência de eventos classificados como de extrema seca na escala anual. O município de Pirenópolis apresentou-se como mais propenso a eventos de categoria de extrema umidade.
3. A escala semestral para os meses de outubro a março apresenta o melhor desempenho na aferição da variação de produtividade da soja.
4. Os valores de SPI para o município de Ipameri, obtiveram o melhor desempenho, com base nos critérios: número de eventos de seca, distribuição de frequências próximas à normal e número de acertos do índice em relação a produtividade ajustada da cultura da soja.

## 7. REFERÊNCIAS

- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Impacts of El Niño and La Niña on agricultural production in southern Brazil and the use of climate forecasts in agriculture. **Applications of climate forecasting for better decision-making processes in agriculture**. Passo Fundo, Embrapa Trigo, p. 217-241, 2001.
- BHALME, H. N.; MOOLEY, D. A. Large-scale drought/floods and monsoon circulation. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 108, n. 8, p. 1197-1211, 1980.
- BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Avaliação e adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às condições climáticas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 4, p. 695-705, 2005.
- BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Análise da escala temporal de monitoramento das secas agrícolas e meteorológicas no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 255-261, 2007.
- BLAIN, G. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BONOMO, R. Índice padronizado de precipitação aplicado às condições de seca no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Capina Grande, v. 14, n. 10, p. 1067-1073, 2010.
- CARNEIRO FILHO, A.; COSTA, K. A expansão da soja no cerrado: caminhos para a ocupação territorial, uso do solo e produção sustentável. São Paulo, **Agroicone**, São Paulo, 2016, 30 p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: - Safra 2014/15. Brasília v.2, n.5, 2015a, 116p. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/> >. Acesso em: nov. 2019.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: - Safra 2014/15. Brasília v.2, n.7, 2015b, 100p. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/> >. Acesso em: nov. 2019.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Safra 2018/19. Brasília, v. 6, n. 9, 2019a, 113 p. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/> >. Acesso em: out. 2019.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Safra 2018/19. Brasília, v. 6, n. 11, 2019b, 104 p. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/> >. Acesso em: set. 2019.
- CUNHA, G. R. et al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 446-459, 2001.
- EDWARDS, D. C.; MCKEE, T. B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Rep.* 97-2, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, CO, 1997, 155 p.
- EMBRAPA. Tecnologias de produção de soja: Região Central do Brasil 2014. Embrapa Soja, Londrina, 2013, 265 p.

- FARIAS, J. R. B. et al. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. Embrapa Soja, Londrina, 2007, 9 p. (Circular Técnica, n. 48).
- FEHR, W R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa, Special Report, n. 80, 1977, p.1-12.
- FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F. da; AMORIM, A. de O.; CARDOSO, A. S. Índices para a quantificação da seca. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, 2009, 45p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 244).
- FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F.; AMORIM, A. Desempenho de índices quantitativos de seca na estimativa da produtividade de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 8, p. 771-779, 2010.
- FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; Estimativa da variação da produtividade do arroz em diferentes escalas temporais do índice SPI. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 4, p. 335-343, 2011.
- FREITAS, M. A. S. Aspectos a serem considerados quando de uma análise regional integrada de secas. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, n. 17, 1996, p. 9-17.
- FREITAS, M. A. S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, n. 5, p. 19-30, 1998.
- FREITAS, M. A. S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, p.84-95, 2005. Suplemento.
- GUEDES, R. V. S; MACEDO, M. J. H.; DE SOUSA, F. A. S. Análise espacial de eventos de secas com base no índice padronizado de precipitação e análise de agrupamento. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais** (Online), n. 23, p. 55-65, 2012.
- GUENANG, G. M.; KAMGA, F. M. Computation of the standardized precipitation index (SPI) and its use to assess drought occurrences in Cameroon over recent decades. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, n. 10, p. 2310-2324, 2014.
- HAGMAN, G.; BEER, H.; BENDZ, M.; WIJLMAN, A. Prevention better than cure. Report on human and environmental disasters in the Third World. **Swedish Red Cross**, Stockholm, v. 2, 1984, 187 p.
- HAYES, M. J.; SVOBODA, M. D.; WILHITE, D. A.; VANYARKHO, O. V. Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Lincoln, Nebraska, v. 80, n. 3, p.429-438, 1999.
- HERBST, P. H.; BREDEKAMP, D. B.; BARKER, H. M. G. A technique for the evaluation of drought from rainfall data. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 4, n. 3, p. 264-272, 1966.

- HOUNAM, C. E.; BURGOS, J. J.; KALIK, M. S.; PALMES, W. C.; RODDA, J. Drought and agriculture: Report of the CagM Working group on the Assessment of Drought. Geneva, Secretariat of the World Meteorological Organization: xv, 127 p., 1975.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. SIDRA - Produção Agrícola Municipal. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>>. Acesso em: 7 mar. 2018.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: Set. 2019.
- IPCC. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G. -K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012, 582 p.
- KEYANTTASH, J.; DRACUP, J. A. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. **American Meteorological Society**, v. 83 n. 8, p. 1167-1180, 2002.
- LLOYD-HUGHES, B.; SAUNDERS, M.A. A drought climatology for Europe. **International Journal of Climatology**, v.22, p.1571-1592, 2002.
- MARIANO, Z. F.; SANTOS, M. J. Z.; SCOPEL, I. Importância das Chuvas para a produtividade da soja na microrregião do sudoeste de Goiás (GO). **Geografia: ações e reflexões**. Rio Claro: UNESP/IGCE: AGETEO, p. 383-398, 2006.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to the time scales. **8º Conference On Applied Climatology**, Anaheim, Califórnia n. 8, p. 17-22, 1993.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE; MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL; WWF-BRASIL. **Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados às secas no contexto da mudança no clima**. Brasília, 2017, 125 p.
- MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Brasília, 2009. 530 p.
- MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005, 30 p.
- NATIONAL DROUGHT MITIGATION CENTER - NDMC. SPI Program. University of Nebraska, Lincoln, 2018. Disponível em: <<https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx>> Acesso em: set, 2019.
- NORTH, G. R.; PYLE, J.; ZHANG, F. (Eds.): **Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Academic Press**, Elsevier, v. 2, 2015, 2998 p.
- PALMER, W. C. Meteorological drought. Washington: U. S. Department of Commerce, Washington, D.C., 1965. 65 p. (Research paper, 45).

- RAMALHO, M. I. V. L. Avaliação da seca global num clima em mudança. Dissertação (Mestrado em Ciências Geofísicas) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013, 53p.
- ROOY, M. P. van. A rainfall anomaly index independent of time and space. **Notos**, Pretoria, v. 14, p. 43-48, 1965.
- SALAS, J. D.; FU, C. J.; CANCELLIERE, A.; DUSTIN, D.; BODE, D.; PINEDA, A.; VINCENT, E. Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 131, p. 383-393, 2005.
- SANTOS, J. F.; PORTELA, M. M. Caracterização de secas em bacias hidrográficas de Portugal Continental: aplicação do índice de precipitação padronizada, SPI, a séries de precipitação e de escoamento. **10º Congresso da Água**, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), Alvor, 2010, 18 p.
- SANTOS, M. S. et al. Definição de Limiares de Secas e Cálculo do Índice de Precipitação Padronizada por Meio de Análise Regional de Frequências na Bacia do Alto São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 95-105, 2013.
- SILVA, J. G. 2º Seminário Internacional sobre Seca e Agricultura, Roma, Itália, jun de 2019. Disponível em: < <http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1198402/>> Acesso em: jul, 2019.
- SHIFERAW, B. et al. Managing vulnerability to drought and enhancing livelihood resilience in sub-Saharan Africa: Technological, institutional and policy options. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 67-79, 2014.
- SOLH, M.; GINKEL, M. V. Drought preparedness and drought mitigation in the developing world' s drylands. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 62-66, 2014.
- SOUSA, F. A. S. et al. O Índice de Precipitação Padronizada (IPP) na identificação de extremos de chuvas e secas na bacia do rio Paraguaçu (BA). **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, Guarapuava, v. 12, n. 2, p. 707-719, 2016.
- TEIXEIRA, C. F. A. et al. Intensidade da seca utilizando índices de precipitação. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 8, n. 3, p. 203-213, 2013.
- THOMAS, A. L; COSTA. J. A. Influência do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da Soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 9, p. 1389-1396, 1994.
- VIEIRA, N. M. Caracterização da Cadeia Produtiva da Soja em Goiás. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002, 124p.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Standardized precipitation index user guide**. World Meteorological Organization Geneva, Switzerland (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood). WMO, n. 1090, Geneva, 2012.

- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) and Global Water Partnership (GWP). **Handbook of Drought Indicators and Indices** (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva, 2016.
- WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. **Water International**, v. 10, n. 3, p. 111–120, 1985.
- WILHITE, D. A. Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. **Drought: A Global Assessment**, London, Routledge, v. 1, n 1, p. 3–18, 2000.
- WILHITE, D. A.; SIVAKUMAR, M. V. K.; PULWARTY, R. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 4-13, 2014.