Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO DESCOBERTO (DF) Á SECA, NO PERÍODO DE 2001 A 2019

Vulnerabilty analysis to drought of Alto Descoberto Basin (DF) in the period from 2001 to 2019

Análisis de la Vulnerabilidad de la Cuenca Hidrográfica del Alto Descoberto (DF) a la Sequía, en el período de 2001 a 2019

Marina Rique Cangiano
Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UNB), Brasília, DF
marinarcangiano@gmail.com

Gustavo Macedo de Mello Baptista
Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UNB), Brasília, DF
gmbaptista@unb.br

Luciana Figueiredo Prado
Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UNB), Brasília, DF e Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP
lucianaprado@unb.br

Rafaela Lisboa Costa
Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, AL
rafaelalisboac@gmail.com

Resumo: Define-se seca como a relação entre a duração de estiagem e seu impacto no balanço hídrico em uma bacia hidrográfica. A classificação da seca tem base na análise das médias baixas da disponibilidade de água, pode resultar em secas: meteorológica, agrícola, hidrológica ou socioeconômica. Os objetivos principais deste artigo foram analisar a sensibilidade da seca, quanto a sua resiliência, vulnerabilidade e exposição à vulnerabilidade utilizando o *Google Earth Engine (GEE)*, e propor um monitoramento para detecção de mudanças por eventos hidrológicos extremos a fim de otimizar a gestão integrada de recursos hídricos. Foram calculados os Índices de Aridez (IA), de Precipitação Padronizada (IPP) e de Severidade de Seca (ISS) para modelar o comportamento da seca hidrológica na bacia do Alto Descoberto, Distrito Federal no período de dezenove anos de 2001 a 2019, assim avaliar o déficit hídrico anual e sazonal. Os resultados demonstraram que a seca na bacia nesta série temporal está classificada como moderada, o seu limite de resiliência é ultrapassado devido a uma crescente demanda hídrica e destaca o fato do uso e ocupação da

cobertura do solo da bacia inadequado, que expõe ao risco de estresse hídrico e requer medidas mais sustentáveis. Os índices - IPP, ISS e IA - foram eficazes para a análise da seca hidrológica e compor um panorama da variabilidade do déficit hídrico regional. Esse artigo contribui para a compreensão da sazonalidade da seca e sua importância nas tomadas de decisões em políticas públicas.

Palavras-chave: Déficit Hídrico. Índice de Aridez (IA). Índice de Precipitação Padronizado (IPP). Índice de Severidade de Seca (ISS). Vulnerabilidade Ambiental

Abstract: Drought is defined as the relationship between the duration and the impact on the water balance in a basin, which can be classified as meteorological, agricultural, hydrological and socioeconomic drought based on the analysis of low average water availability. The main objectives of this research were to analyze the sensitivity of the drought due to its resilience, to its vulnerability and to its exposure to drought by using the Google Earth Engine (GEE); and as well as to propose a monitoring to detect changes brought about extreme hydrological events in a way to improve the integrated management of water resources. Aridity Index (AI), Standardized Precipitation Index (SPI) and Drought Severity Index (DSI) were calculated to model the behavior of the hydrological drought in the Alto Descoberto basin in Distrito Federal, Brazil, during a period of nineteen years, from 2001 to 2019, besides to evaluate the annual and seasonal water deficit. The index results showed that the basin is experiencing a moderate drought, with its resilience limit exceeded due to its high water demand and calls attention to the use and occupation of the basin's soil cover, to avoid water stress with more sustainable measures. These indices – AI, SPI and DSI - proved effective for the analysis of hydrological drought and provided an overview of the variability of the regional water deficit. This article contributes to the understanding of seasonality of drought and its importance in decision-making in public policies.

Keywords: Water deficit. Aridity Index (AI). Standardized Precipitation Index (SPI). Drought Severity Index (DSI). Google Earth Engine. Environmental Vulnerability.

Resumen: La sequía se define como la relación entre la duración del periodo seco y su impacto en el balance hídrico de una cuenca hidrográfica. La clasificación de la sequía se basa en el análisis de las medias bajas de la disponibilidad de agua, pudiendo tener como resultado diferentes tipos de sequía: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica. Los principales objetivos de este artículo fueron analizar la sensibilidad de la sequía en relación a su resiliencia, vulnerabilidad y exposición a la vulnerabilidad utilizando el *Google Earth Engine* (GEE) y proponer un monitoreo para la detección de cambios por eventos hidrológicos extremos, con el fin de optimizar la gestión integrada de los recursos hídricos. Se calcularon los Índices de Aridez (IA), de Precipitación Estandarizado (IPE) y de Severidad de la Sequía (ISS) para modelar el comportamiento de la sequía hidrológica en la cuenca del Alto Descoberto, Distrito Federal, Brasil, en el periodo de diecinueve años de 2001 a 2019 para evaluar el déficit hídrico anual y estacional. Los resultados mostraron que la sequía en la cuenca en esta serie temporal se clasifica como moderada, con su límite de resiliencia sobrepasado debido a una demanda hídrica creciente, y destaca el uso y la ocupación inadecuados de la cobertura del suelo de la cuenca, que expone al riesgo de estrés hídrico y requiere medidas más sostenibles. Los índices – IA, IPE e ISS - fueron eficaces para el análisis de la sequía hidrológica y para obtener un panorama de la variabilidad del déficit hídrico regional. Este artículo contribuye a la comprensión de la estacionalidad de la sequía y de su importancia en la toma de decisiones en políticas públicas.

Palabras clave: Déficit hídrico. Índice de aridez (IA). Índice de Precipitación Estandarizado (IPE). Índice de Severidad de la sequía (ISS). Google Earth Engine (GEE). Vulnerabilidad ambiental.

Submetido em: 27/07/2022
Aceito para publicação em: 03/12/2022
Publicado em: 10/01/2023

1. INTRODUÇÃO

O conceito de vulnerabilidade é amplamente utilizado com diferentes perspectivas metodológicas e integra pesquisas multidisciplinares em diferentes campos científicos como as ciências sociais, as ciências naturais e a engenharia para entender as circunstâncias que colocam as populações e os locais em risco (CUTTER, 2011; CHEN *et al.*, 2019). Contudo, a vulnerabilidade é o potencial para a perda e a propensão ao risco, ou seja, a capacidade da população, da infraestrutura ou dos sistemas físicos em responder às ameaças ambientais (CUTTER, 1996; ADGER, 2006).

Por ser um conceito multidisciplinar e possibilitar a junção de ferramentas e tecnologias, a análise da vulnerabilidade pode auxiliar na tomada de decisão dos agentes públicos para problemas que lidem com emergências e segurança quanto aos desastres naturais, ecologia, definição de regiões *hotspots*, mudanças climáticas, uso e ocupação do solo e diagnósticos socioeconômicos (SIMPSON; HUMAN, 2008; FRASER; SIMELTON; TERMANSEN, 2013; JOSEPH, 2013; KOVAČEVIĆ-MAJKIĆ *et al.*, 2014; FUCHS; GLADE, 2016).

Uma bacia hidrográfica é uma região dimensionada pela sua área de drenagem a um corpo hídrico principal, sendo um resultado de processos naturais. O homem necessita entender o seu comportamento para utilizar seus recursos, proteger e monitorar para criar medidas preventivas em condições extremas, como por exemplo precipitações extremas, estiagens, modificações do uso do solo (TUCCI, 2005). As interações antrópicas juntamente com a dinâmica externa do planeta modificam as paisagens, as quais se tornaram entidades geoecológicas (CAVALCANTI, 2014).

Segundo Tundisi (2011), o Distrito Federal (DF) tem a terceira menor disponibilidade hídrica *per capita* do país, perdendo apenas para Pernambuco e Paraíba. Dessa forma, é apontado como umas das regiões mais sensíveis à escassez hídrica no Brasil. As baixas disponibilidades hídricas do DF contrastam com o aumento da demanda de abastecimento de água, devido ao aumento populacional e à criação de novos núcleos urbanos (ADASA, 2012).

Nesse contexto, a bacia hidrográfica escolhida para esse estudo foi a do Alto Descoberto, localizada a oeste do Distrito Federal, pertencente a região hidrográfica do rio Paraná e faz parte do bioma Cerrado - a maior savana neotropical e a mais rica de espécies com uma área de dois milhões de km^2, ou seja, 24,1% do território nacional (MMA, 2007). Há

um incentivo à conservação deste bioma para o uso sustentável de seus recursos, pois é uma unidade ecológica típica da zona tropical que se caracteriza por uma vegetação de fisionomia e flora próprias. Esse bioma, por fazer fronteira da expansão agrícola do país está sujeito a erosão, a supressão da vegetação nativa e a perda de fertilidade (SCARIOT; SOUSA-SILVA; FELFILI, 2005).

A seca é um fenômeno natural, sendo identificada quando ocorre um período longo sem chuva e com as médias mensais de precipitação abaixo das normais climáticas registradas para uma bacia hidrográfica (KUMAR *et al.*, 2016). Frequentemente é associada à grandes perdas socioeconômicas e danos aos ecossistemas naturais, por ser detectada em pouco tempo pelo seu reflexo na diminuição da qualidade e quantidade dos recursos hídricos de uma região. Assim, a seca pode ser classificada, quanto a sua frequência, severidade e duração, em: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica (WILHITE; VANYARKHO, 2000; SADEGHI; HAZBAVI, 2017; SILVA, 2020).

A seca meteorológica é definida em escala mensal quanto a duração de período seco, o que diferencia da seca hidrológica por ser perceptível em uma análise a partir de seis meses ou mais de déficit de precipitação acumulada em uma bacia hidrográfica, além de detectar as áreas de fragilidades hídricas (WMO, 2005; MISHRA & SINGH, 2010). Já a seca agrícola relaciona as características da seca meteorológica com a seca hidrológica, sendo associada a perda de umidade do solo (WMO, 2005; MISHRA & SINGH, 2010). Além disso, propõem-se, a seca socioeconômica ocorre quando a escassez de água passa a afetar a demanda da água para atividades econômicas e as pessoas, de modo individual ou coletivo (WMO, 2005; MISHRA & SINGH, 2010).

Há vários índices amplamente utilizados para monitoramento da seca tanto em escala regional quanto global. Os índices de seca integram e dependem de grande quantidade de dados como precipitação, fluxo de riachos, indicadores de abastecimento de água e de neve para zonas temperadas. Assim, o uso das imagens de satélites facilitam a obtenção dos dados das variáveis necessárias para estes índices por fornecem informações temporal e espacialmente contínua sobre as superfícies terrestres, sendo um processo mais rápido e ágil (MU *et al.*, 2013).

Os indicadores de seca como resiliência, vulnerabilidade e exposição auxiliam na análise dos índices de seca quanto a temporalidade dos eventos extremos climatológicos.

Apesar da similaridade nesses termos, considerou-se que a resiliência é a capacidade de uma bacia hidrográfica em retornar ao seu estado natural após um evento de seca. A vulnerabilidade é o grau de suscetibilidade do sistema natural aos eventos de seca. Já a exposição é a duração média da seca em uma bacia hidrográfica. Portanto, a variabilidade espacial dessas variáveis hidroclimáticas pode levar a alterações regionais na oferta e demanda de disponibilidade de recursos hídricos e por conseguinte afetarão a disponibilidade de alimentos e a deterioração da qualidade de água e assim, a saúde humana (PIANOSI *et al.*, 2016; AQUINO *et al*, 2017; VEETTIL *et al.*, 2018).

Nesse sentido, os objetivos principais deste artigo foram analisar a vulnerabilidade da seca na região da bacia hidrográfica do Alto Descoberto (DF), a partir da análise espaço-temporal no período de dezenove anos (2001 a 2019), quanto a sua resiliência, vulnerabilidade e exposição à seca e seu balanço hídrico utilizando o *Google Earth Engine (GEE)*. Além disso, propõem-se uma metodologia para auxiliar nas tomadas de decisões em relação a gestão integrada de recursos hídricos, por meio do monitoramento de extremos climáticos, e assim, determinar o déficit hídrico resultante da demanda regional da bacia.

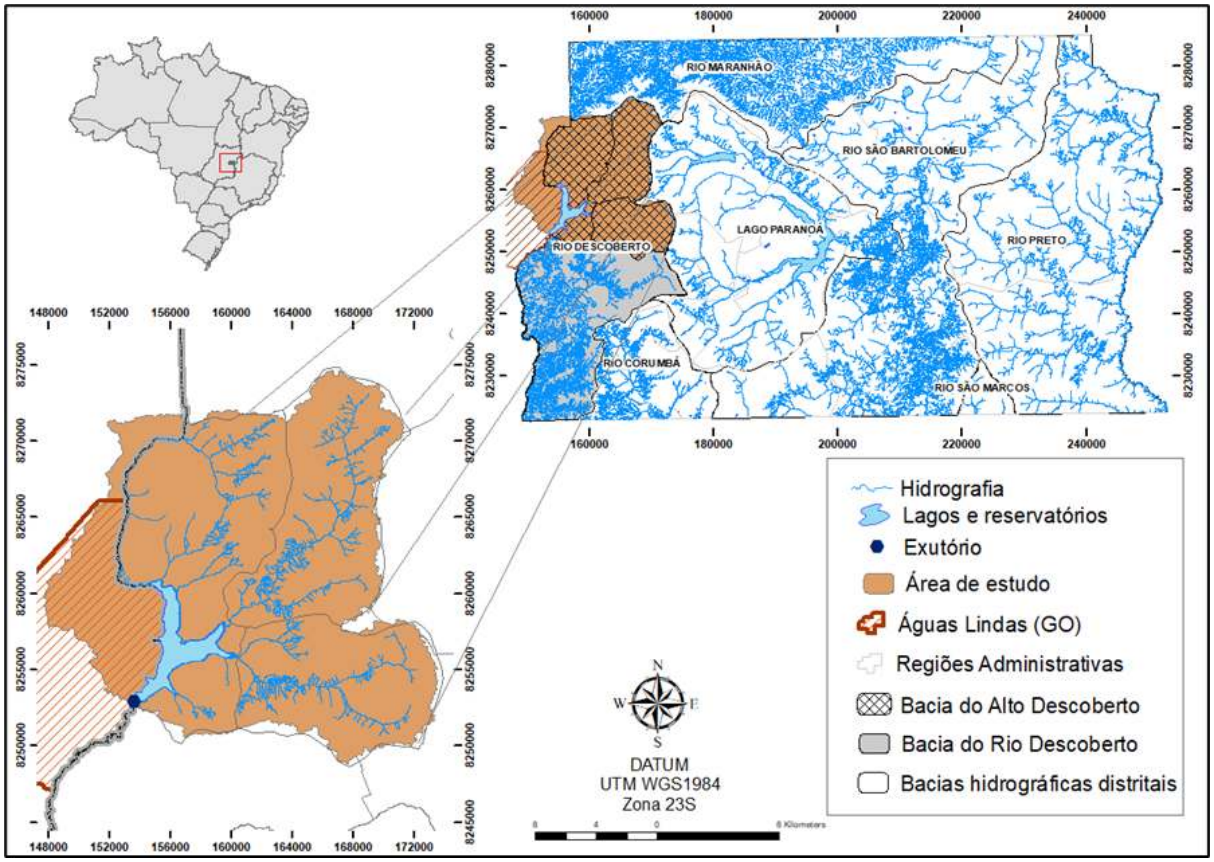
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e Caracterização da Área Experimental

O estudo foi realizado na região da bacia hidrográfica do Alto Descoberto localizada ao norte da bacia hidrográfica do rio Descoberto; tendo o Reservatório do Rio Descoberto como exutório, que abastece o principal sistema de produção de água do Distrito Federal - responsável por 58,5% da água produzida e pelo atendimento de 67% da população do Distrito Federal (ADASA, 2012). Além de ser uma região agrícola, com produção frutífera de 42,33% e olerícola, com 17, 87% de acordo com o relatório agropecuário do DF da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER) de 2017.

A área da bacia é de 426, 56 km^2. Essa região compõe o adensamento humano que une às Regiões Administrativas de Brazlândia e Taguatinga, somente nestas concentram-se 37,53% da população do Distrito Federal, e parte da cidade Águas Lindas (GO) (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Figura 1 - Localização da área de estudo, bacia do Alto Descoberto, DF.



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

A vegetação da bacia é caracterizada pelo bioma Cerrado, que compõe um mosaico com diferentes formações fitofisionômicas como savânicas, lenhosas e campestres. Essas diferenças das fitofisionomias são devido à combinação entre a sazonalidade climática, as características físico-químicas dos solos e a ocorrência de queimadas, pois algumas árvores são dependentes do fogo para ocorrer a floração (SCARIOT; SOUSA-SILVA; FELFILI, 2005).

As principais classes do solo da bacia, segundo Reatto (2003), são Latossolo Vermelho-Amarelo (36, 58%), Latossolo Vermelho (34, 09%), Cambissolo (13,8%), Gleissolo Hálpico (3,38%), Gleissolo Melânico (1,58%), Plintossolo (1,11%), Neossolo Flúvico (0,50%), Neossolo Quartzênico (0,17%).

O clima do Distrito Federal de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, predomina o Aw – clima tropical com a temperatura média superior a 18°C, com uma estação fria e seca nos meses da estação de inverno (maio a setembro), e no verão, sendo úmido e chuvoso (outubro a abril). E com algumas áreas específicas de climas subtropicais Cwa (com chuva de verão e verão quente e inverno seco com a temperatura variando na faixa de -3°C a

18°) e Cwb (temperatura abaixo de 22°C com inverno seco e verão temperado) por estar numa faixa altimétrica entre 1.000 m e 1.200 m (BAPTISTA, 1998;CARDOSO; MARCUZZO; BARROS, 2014; FRÉCCIA, 2020; MARTINS; NASCIMENTO; NOVAIS, 2020).

Através das Normais Climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET para essa região, encontraram-se os valores médios e totais a seguir: uma temperatura, que varia entre 17,75°C a 31,5° com uma média de 21,45°C; uma precipitação média total para os meses secos de 111,6 mm e para os meses úmidos de 1.365,8 mm, e uma precipitação média anual de 1.477,4 mm; e uma mínima de umidade relativa de 46,8% e máxima de 65,8%.

As chuvas que acontecem durante o verão são intensificadas com as massas de ar, que tem uma circulação periódica, que podem modificar os sistemas atmosféricos, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Frente Polar (FP) pela atuação da ZCAS, que resultam em uma elevada na atividade convectiva. Essas zonas se encontram no Centro-Oeste do Brasil (NASCIMENTO; NOVAIS, 2020; PRADO *et al.*, 2021).

2.2. Obtenção dos dados para o estudo

As imagens para análise estão descritas na Tabela 1, com as características principais de cada uma, e a descrição mais detalhada se encontram nos subitens 3.2.1.1 e 3.2.1.2. Todas essas imagens estão presentes na plataforma do *Google Earth Engine* (GEE) e foram importadas a partir do *script* construído para as análises deste estudo.

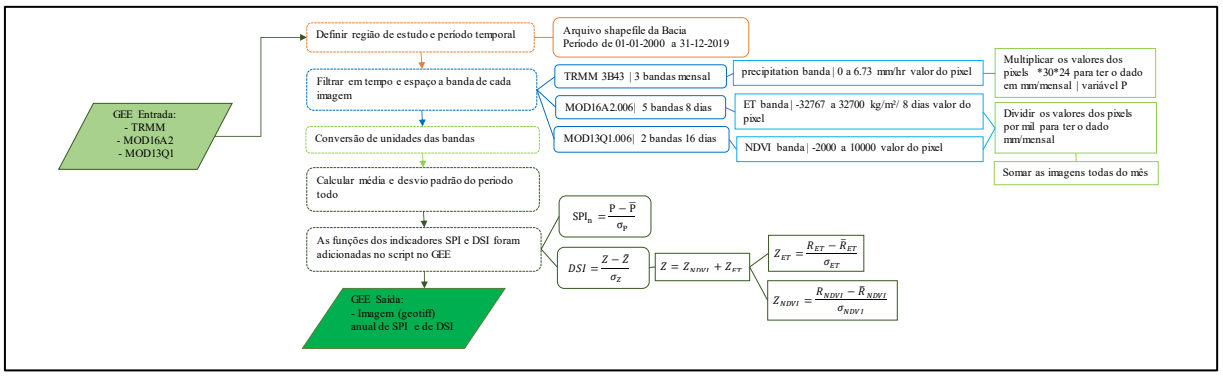
Tabela 1 - Conjunto de dados usados no estudo.

Nº	Nome	Versão	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Unidade	Período Temporal	Ref.
1	TRMM 3B43: Monthly Precipitation Estimates	7	0,25°	1 mês	mm/h	1998-01-01 a 2019-12-01	(TRMM, 2011)
2	MOD16A2.006: Terra Net Evapotranspiration	6	500 m	8 dias	kg/m²/8 dias	2001-01-01 a 2020-12-02	(RUNNING et al, 2017)
3	MOD13Q1.006 Terra Vegetation Indices	6	250 m	16 dias	-	2000-02-18 a 2020-12-18	(DIDAN, 2015)

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

O *script*[1] para o desenvolvimento desse estudo foi construído ao longo do avanço da pesquisa na linguagem de JavaScript seguindo a rotina no GEE (Figura 2). Para criar cada coleção de imagem foi recortado na bacia e na série temporal de 19 anos, pois o produto MOD16A2 começou a ser publicado em 2001 o que possibilitou uma amostra suficiente de eventos correlatos para uma maior eficácia na modelagem, e a conversão da unidade das imagens TRMM com a precipitação acumulada e do produto do MODIS MOD16A2 com dados de evapotranspiração potencial (ETP) no GEE. Após a conversão das unidades, foi realizada a média da coleção (247 imagens) para uma imagem de cada ano, junto com desvio padrão. Em seguida, os valores brutos foram passados para uma tabela e assim, foram obtidos os dados de precipitação e evapotranspiração anual para a bacia.

Figura 2 - Rotina no GEE para construção do *script*.



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

Os dados pluviométricos foram obtidos pelas imagens TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) do algoritmo 3B43, que fornece estimativas de precipitação horária (mm/hora), diária (mm/dia) e mensal (mm/mês) numa grade de resolução espacial de 0, 25° por 0, 25°. Nesse algoritmo utiliza-se uma técnica *Multisatellite Precipitaion Analysis* (TMPA) que consiste em uma combinação de estimativas de precipitação pelos sensores: de microondas passivo proveniente do *TRMM Microwave Imager* (TMI), que quantifica o vapor d'água, água da nuvem e intensidade da precipitação na atmosfera; *Visible and Infrared Scanner* (VIRS), e que detecta a radiação vinda da terra em cinco regiões espectrais (0, 63 – 12 µm); *Cloud and Earth radiant energy sensor* (CERES). Esses dados foram utilizados para estudar

[1] Para acessar o *script*: https://code.earthengine.google.com/6ec213a3ff98c382eb7d0cfd93510ac3 construído no Google colab pelos autores.

a energia trocada entre o Sol, a atmosfera, a superfície e as nuvens da Terra foi por período limitado de 1998 a 2000; *Lightning Imaging Sensor* (LIS) em órbita estacionária e permite detectar relâmpagos sobre a região tropical, possibilitando avisos de alertas de tempestades severas (TRMM, 2011; MOREIRA *et al.*, 2017).

Um dos motivos principais do uso do sensor MODIS foi a praticidade da disponibilidade dos dados em forma de produtos. Em cada produto é aplicado algoritmos específicos para estudos de balanço de radiação, de vegetação e cobertura da terra em diferentes níveis de processamento, os dados finais são em forma de coleções, sendo que todas as imagens das coleções anteriores são reprocessadas em função da atualização contínua nos algoritmos.

O sensor MODIS possui elevada resolução radiométrica (12 bits), medida por meio de 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14, 4 µm do espectro eletromagnético. As duas primeiras bandas (620 - 679 nm e 841 - 876 nm) possuem resolução espacial de 250 m no nadir. As 5 bandas seguintes (459 -479 nm; 545 – 565 nm; 1230 - 1250 nm; 1628 – 1652 nm; e 2105 – 2155 nm) diferem das bandas anteriores pelo tamanho do pixel de 500 m. E as demais 29 bandas possuem 1 km de resolução espacial.

Foi utilizado o produto com dados de evapotranspiração obtidos pelo satélite MODIS do sensor Terra. O MOD16A2[2] Versão 6 de Evapotranspiração e de fluxo de calor latente é uma composição de imagens com 8 dias em uma resolução de 500 metros. As cenas utilizadas serão de datas próximas umas das outras, geradas preferencialmente entre início de janeiro e dezembro, para cada ano avaliado de 2001 a 2019.

O algoritmo usado para a coleção do produto de dados do MOD16 é baseada na lógica da equação Penman-Monteith, que inclui entrada de dados para análises meteorológicas diárias com o sensor MODIS, remotamente entram produtos de dados sensíveis, tais como propriedades dinâmicas de vegetação, albedo e cobertura do solo (RUNNING *et al.*, 2019).

Outro produto MODIS do Terra usado foi MOD13Q1[3], a versão 6, a mais atual e as imagens são geradas a cada 16 dias com resolução espacial de 250 metros. O produto MOD13Q1 fornece duas camadas de vegetação primária, por meio de dois índices de vegetação. A primeira camada é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI),

[2] Produto MOD16A2: https://explorer.earthengine.google.com/#detail/MODIS%2F006%2FMOD16A2

[3] Produto MOD13Q1: https://explorer.earthengine.google.com/#detail/MODIS%2F006%2FMOD13Q1

derivado da série de satélites *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA) acoplado ao sistema sensor orbital *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR). A segunda camada é com o Índice de Vegetação Melhorada (EVI), que aprimora a sensibilidade em regiões de alta biomassa, pela a redução nas influências atmosféricas, o que facilita o monitoramento da vegetação (DIDAN, 2015).

2.3 Análise dos dados

Parte da análise dos dados foi realizada na plataforma do GEE ao gerar uma imagem *raster* com o somatório da precipitação anual e mensal, juntamente com os valores de desvio padrão e de média, de precipitação, evapotranspiração e NDVI, pois cada coleção das imagens TRMM e MODIS possui 247 imagens cada. Ao fazer a média, possibilitou a redução na quantidade de imagens, uma para cada mês, ou seja, 12 imagens para cada ano. Destes foram criadas funções dos índices de severidade de seca e precipitação padronizada, que serão descritos nos itens: 2.4 e 2.5 respectivamente. E assim, analisar a demanda hídrica e a sua pressão quanto ao uso e ocupação do solo por meio das equações que calculam a duração e a severidade da seca.

2.4 Índice de Severidade de Seca (ISS)

O Índice de Severidade de Seca (ISS) – *Drough Severity Index* é medido por sensoriamento remoto pela razão entre a Evapotranspiração Potencial (MOD16) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e foi desenvolvido pela Sociedade Meteorológica Estadunidense (*American Meteorological Society*) usando apenas as informações de dois produtos MODIS (MU *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2020).

Os satélites Terra e Aqua do MODIS incluem os produtos MOD16 ET/PET (Mu et al. 2007, 2009, 2011b) e fornecem um meio para quantificar os fluxos de água entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera. Os dados MOD16 ET e PET são usados como entrada primária para calcular o ISS em uma base global para todos os ecossistemas terrestres em intervalos de tempo contínuos de 8 dias, mensais e anuais e resolução espacial de 1 km. Com os dados ET/ETP e NDVI faz o cálculo do ISS, pois são variáveis nesse indicador.

2.5 Índice de Precipitação Padronizado (IPP)

O Índice de Precipitação Padronizado é calculado com os dados de precipitação mensal acumulada, para a análise quantitativa do déficit hídrico (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993; GONÇALVES *et al.*, 2021).

Para efetuar o cálculo do IPP utilizou-se o *software* livre DrinC 1.7 – *Drought Indices Calculater* desenvolvido pelo *Centre for the Assessment of Natural Hazards and Proactive Planning and the Laboratory of Reclamation Works and Water Resources Management of the National Technical University of Athens* (TIGKAS; VANGELIS; TSAKIRIS, 2015), foi liberado para público em 17 de abril de 2019. O dado carregado nele foi a série temporal de precipitação obtida pelo TRMM para o período de 19 anos (janeiro de 2001 a dezembro de 2019), estes foram ajustados na distribuição de probabilidade Gama. Em seguida, a probabilidade acumulada de ocorrência de cada total mensal é estimada. O resultado foi uma planilha em arquivo xls, formato proprietário do MSExcel com IPP-3, IPP-6 e IPP-12, respectivamente de 3, 6 e 12 meses.

2.6 Análise da vulnerabilidade à seca

A vulnerabilidade ambiental foi analisada pela perspectiva da seca a partir dos valores de precipitação da série temporal com as equações de resiliência, vulnerabilidade, exposição e frequência (Tabela 2), a partir do resultado do Índice de Aridez (IA), que é a relação entre a média de precipitação (P) e a média de evapotranspiração potencial (ETP) (DAVID, 2020; FRÉCCIA, 2020). A quantidade de eventos de seca (M) foi contabilizada a partir desse índice.

A importância em analisar a variabilidade do IA é que ele pode detectar mudanças na variabilidade climática, regiões com risco de degradação do solo e até mesmo a susceptibilidade à desertificação (LOPES, 2015; FRÉCCIA, 2020; SANTOS, 2020; SILVA *et al*, 2020).

Tabela 2 - Equações para análise da Resiliência, Vulnerabilidade, Exposição e Frequência à seca.

Nº	Equações	Unidades	Definições	Referência
1	$IA = \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{ETP}}$	Adimensional	[IA] Índice de Aridez- *Aridity Index* [P] Precipitação Total Mensal (mm) [ETP] Evapotranspiração potencial (mm)	Sadeghi e Hazbavi, 2017
2	$Vu = \frac{\sum_{IA<1} IA}{\mathrm{M}}$	Adimensional	[*Vu*] Vulnerabilidade à Seca [*Re*] Resiliência à Seca	Sadeghi e Hazbavi, 2017
3	$Re = \frac{\mathrm{M}}{\sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{M}} \mathrm{DD_i}}$ $Ex = \frac{\sum_{i=1}^{M} \mathrm{DD}_i}{\mathrm{TD}}$	Adimensional	[M] Quantidade de eventos de Seca (un) [DD] Duração da seca (mês) [*Ex*] Exposição à condição de seca	Sadeghi e Hazbavi, 2017
4		Adimensional	[TD] Total de Meses da série temporal	Veetil, 2018
5	$Fr = \frac{\mathrm{M}}{\mathrm{n}}$	Adimensional	[*Fr*] Frequência de ocorrência de seca [n] Total de anos da série temporal	Veetil, 2018

Fonte: Elaborada pelos autores (2021).

2.7 Validação Estatística

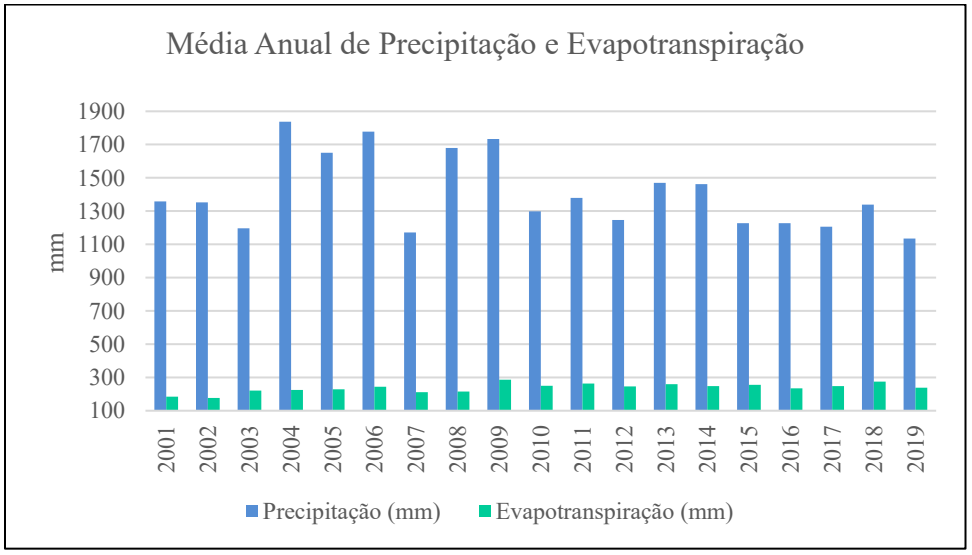
Na validação dos dados, os testes estatísticos aplicados para analisar a significância e o comportamento da variância dos resultados com critério de 95% de confiança, foram utilizados os suplementos Análise de Dados, *Action* e *Real Statistics* do MSExcel. Tanto para os dados brutos – as variáveis de precipitação e evapotranspiração potencial, e quanto para os índices foram analisados com estatística descritiva, com uso de gráfico *box plot*, histograma e teste de normalidade. Para o teste de normalidade dos dados foi utilizado o testes Shapiro-Wilk, que determina o comportamento da variação e a distribuição dos dados é normal quando $p > 0,05$ (LANDIM; YAMAMOTO, 2013; TRIOLA, 2017).

Para determinar a presença de diferenças significativas entre os períodos e os resultados dos índices elencados anteriormente no estudo, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis (H) com as seguintes hipóteses: H_0: Não existe diferença significativa estatisticamente na distribuição nas medianas das variáveis e dos resultados dos índices ($p>0,05$); H_1: Há diferenças estatisticamente significantes na distribuição ($p<0,05$), nem todas as medianas são iguais. Com a afirmação da diferença, utilizou-se o teste Mann-Whitney para saber os anos que teve diferença significativas (TRIOLA, 2017; VOLPATO; BARRETO, 2016; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estimativas de precipitação média e evapotranspiração potencial na área de estudo foram identificadas por meio das análises das imagens de satélite TRMM e MODIS na plataforma do GEE. A estimativa foi com base na série temporal de 19 anos. A partir desse método a precipitação média anual foi de 1.407,93 mm, com o maior acumulado em 2004 (1.837,44 mm) e a menor em 2019 (1.136,05 mm). Portanto, a média anual de evapotranspiração potencial foi de 237,28 mm, sendo o maior valor de 286,21 mm em 2009 e o menor valor de 176,09 mm em 2002 (Figura 3).

Figura 3 - Média anual de Precipitação e Evapotranspiração Potencial.



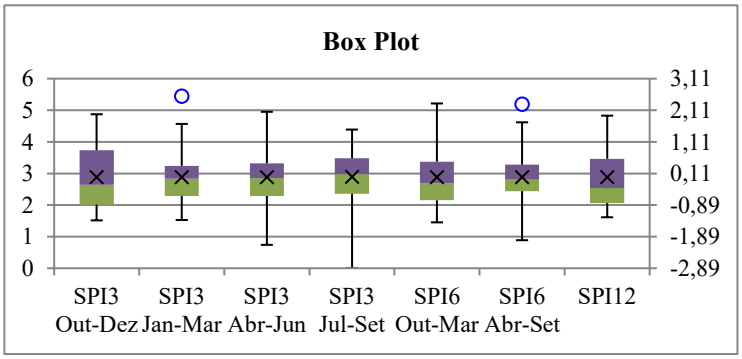
Fonte: Elaborado pelos autores com dados de TRMM-3B43 e MODIS-MOD16.

Os resultados de precipitação foram a entrada de dados para o cálculo do índice de precipitação padronizado (IPP) em uma escala trimestral, semestral e anual: IPP-3 são o acúmulo da precipitação a cada três meses – tendo como resultado de Outubro a Dezembro, Janeiro a Março, Abril a Junho e Julho a Setembro, dos IPP-6 a cada seis meses – Outubro a Março e Abril a Setembro, e o IPP-12 de doze meses, da série temporal de 19 anos (2001 a 2019). Os valores dos índices são determinados por comparação da precipitação acumulada mensal com a média para o mesmo período dos anos da série, ou seja, secas hidrológicas são representadas nos valores menores que -1,0, enquanto o excesso de chuva cada vez mais severa é indicado conforme o aumento do IPP acima de 1,0 (GUEDES; MACEDO; SOUZA, 2012).

O gráfico *box plot* demonstrou a variabilidade do IPP nos máximos e nos quartis medianos, que representa o eixo de 1 a 6 (Quadro 1) com *outliers* (círculo em azul) máximos em IPP-3 de janeiro a março para o ano de 2003 e IPP-6 de abril a setembro para o ano de 2009. Representa que os valores mais altos tanto para os negativos (-2,5 a 0) quanto positivos (de 0 a 2.5 – umidade) são provenientes nessas sequências de IPP-3 de janeiro a março e IPP-6 de abril a setembro.

Quadro 1 - a) Gráfico *box plot* das medianas e quartis dos IPP-3, IPP-6 e IPP-12; b) Resultado dos testes de normalidade Shapiro-Wilk e de comparação das medidas centrais Kruskal-Wallis.

a.



b.

Teste de Normalidade	
Shapiro-Wilk	
W	0,976
p value	0,03
alpha	0,05
Teste de comparação das medidas centrais	
Kruskal-Wallis	
H	0,37
p value	0,99
alpha	0,05

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Os três IPP da bacia hidrográfica do Alto Descoberto variam de -2,89 a 2,5. Os anos mais secos da série temporal foram: 2004, 2010, 2016 com -1,05, -0,45 e -1,27 do IPP-12 respectivamente, os outros dois também tiveram valores negativos nesses anos. O que faz sentido, pois a precipitação anual desses anos foi aproximadamente a 14% abaixo da média anual de 1.407,93 mm. Com destaque aos anos 2010 nos meses julho a setembro, o IPP-3 foi de -2,89 e 2016 nos meses de abril a setembro o IPP-6 foi de -2,0 presenta a severidade extrema da seca e identifica os problemas mais críticos nos recursos hídricos, pois a precipitação foi bem abaixo da média os valores de IPP com mais impactos significativos são os menores que -1,5.

Os anos mais úmidos foram em: 2002, 2005 e 2009 com 1,49, 1,78 e 1,73 do IPP-12 respectivamente. A precipitação anual desses anos foram aproximadamente 23% acima da

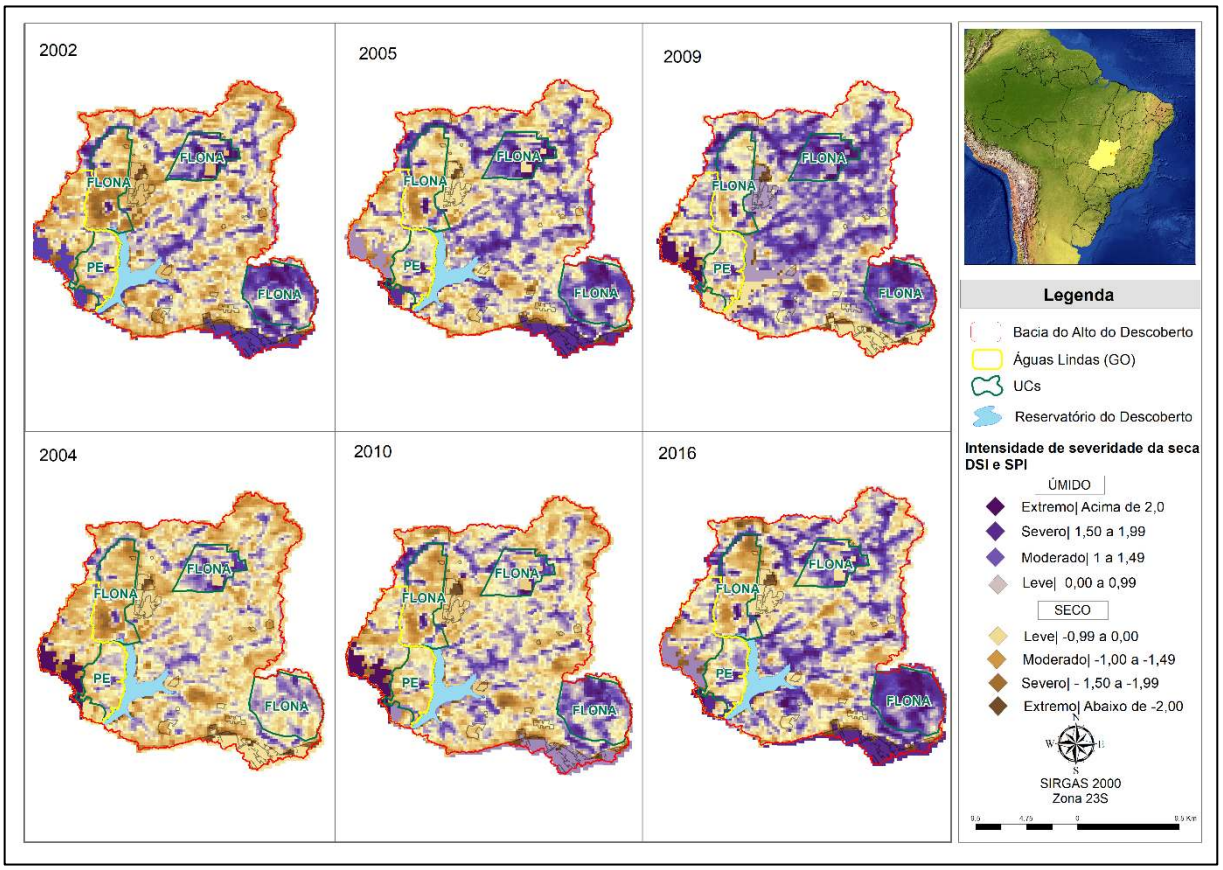
média anual de 1.407,93 mm. No estudo de avaliação da seca para a bacia hidrográfica do Alto Rio São Francisco (SANTOS *et al.*, 2017) que usou dados TRMM e IPP em uma série temporal de 15 anos (1998-2013), a média de precipitação anual foi de 1.440 mm, o ano mais úmido foi 2008 e o mais seco 2012, mesmo com a distância espacial das duas bacias, há uma similaridade nos resultados quanto a dinâmica da precipitação, pois estão no mesmo sistema meteorológico Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (PRADO *et al.*, 2021).

A figura 4 mostra as imagens da junção dos índices IPP e ISS para a bacia de estudo nos anos mais úmido 2002, 2005 e 2009, e os anos mais seco 2004, 2010 e 2016, sendo a comparação entre eles, de acordo com a classificação de severidade de seca. A variação de coloração entre marrom e roxo, as tonalidades de marrom são para valores entre -2,5 a 0, ou seja, representam a seca, enquanto o roxo é para os valores de 0 a 2,5, com mais umidade.

Quanto a relação de dependência dos resultados dos IPP, o teste de Mann-Whitney demonstrou que os pares dos anos de 2002 e 2004, 2005 e 2010, e 2009 e 2016 tiveram uma diferença estatisticamente significativa nas medianas ($p < 0, 05$) com p igual a 0,011 a 0,015 para todos os três IPP, com U igual a 4.

Em relação ao uso e ocupação do solo, na imagem da figura 4, mostra as delimitações das áreas de unidades de conservação – Floresta Nacional de Brasília (FLONA) e Parque Estadual do Descoberto (PE) – e áreas de mananciais nas tonalidades roxas mesmo no ano mais seco, esses locais permaneceram com umidade devido a vegetação preservada. Já as regiões com tonalidades de marrom a bege representam áreas urbanizadas a cidade de Águas Lindas (GO) (delimitada pela linha amarela) e agrícolas, por serem áreas de alto potencial de impermeabilização. O que demonstra a importância da cobertura do solo no regime hídrico.

Figura 4 - Mapa dos anos extremos de seca dos índices ISS e IPP[4]. Mais úmido: 2002, 2005 e 2009; Mais seco: 2004, 2010, 2016.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Os IPP-3 e o IPP-6 podem ser analisados por blocos de meses, que retratam a sazonalidade e como há uma tendência da diminuição da precipitação na média mensal. O resultado do IPP-3 (Figura 5a) mostra que há um fenômeno cíclico com períodos de secas curtas, porém a bacia estudada está em uma baixa, com déficit hídrico há 4 anos. Outra relação forte foi entre o IPP-6 de abril a setembro e IPP-3 de abril a junho com r igual a 0,739 e significativa com $p < 0,001$ mostra que a variância é mais consistente linearmente nos meses de abril a junho.

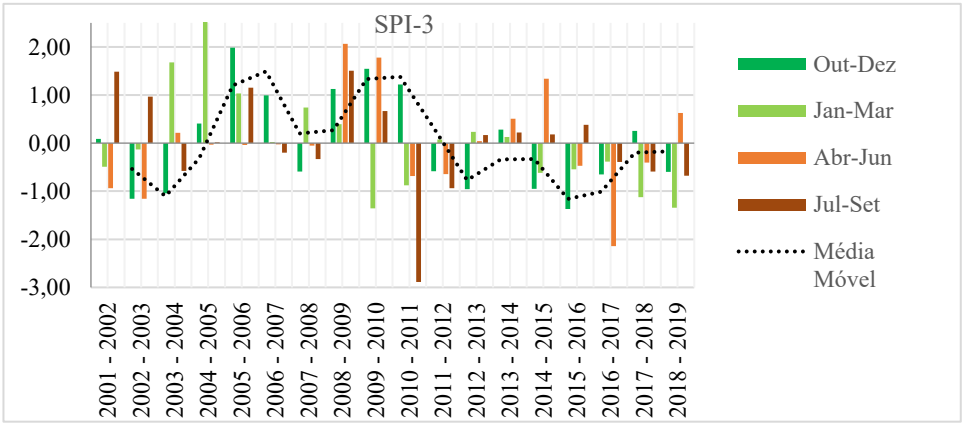
A ocorrência de secas em frequência diferentes no mesmo ano, identificadas no IPP-3, IPP-6 e IPP-12 demonstram que suas intensidades foram expressivas em atingir escala temporal diferente, a precipitação do período não foi suficiente para suprir o déficit hídrico

[4] Siglas traduzidas do inglês. Índice de Severidade de Seca - *Drought Severity Index* (DSI) e Índice de Precipitação Padronizado – *Standardized Precipitation Index* – SPI.

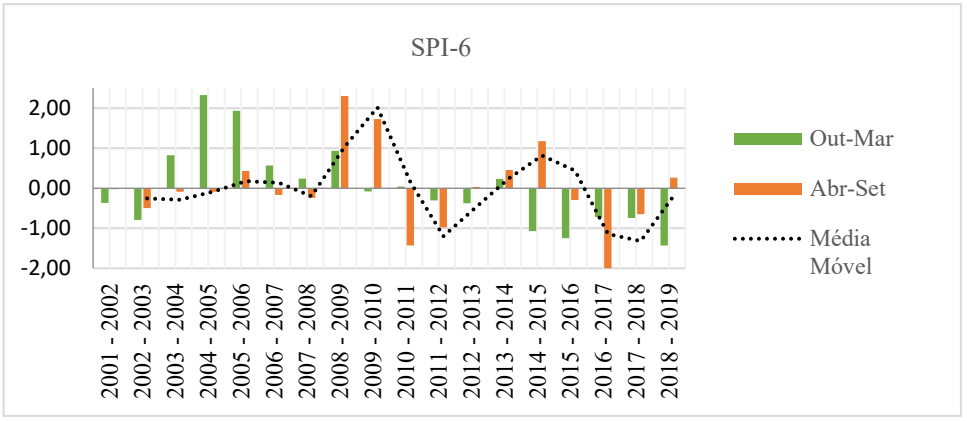
na escala maior e as secas moderadas (entre -1,0 e -1,49) indicam uma tendência de escassez hídrica na área analisada (GUEDES; MACEDO; SOUZA, 2012; SOUSA, *et al.*, 2016; SANTOS, *et al.*, 2017; SANTOS, 2020).

Figura 5 - a) Resultado do IPP-3 em 4 blocos mensais: outubro-dezembro, janeiro-março, abril-junho e julho-setembro e com (r) de 0,19 e p < 0,05; b) Resultado do IPP-6 em dois blocos mensais: outubro-março e abril-setembro com r de 0,12 e p < 0,05.

a)



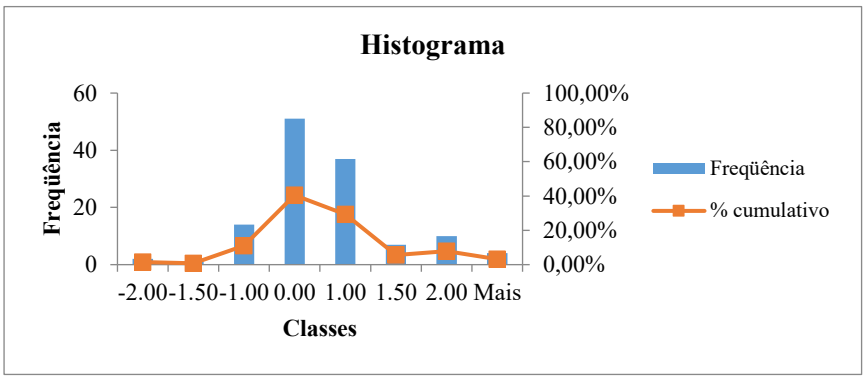
b)



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Para a bacia hidrográfica do Alto Descoberto as classes de seca para o período de 19 anos foram predominantes em seca leve (40,48%), seguida por seca moderada (11,11%), seca severa (0,79%) e seca extrema (1,59%) (Figura 6).

Figura 6 - Histograma do percentual das classes de seca e tabela de frequência.



Classes	*Frequência*	*%*
-2.00	2	1.59%
-1.50	1	0.79%
-1.00	14	11.11%
0.00	51	40.48%
1.00	37	29.37%
1.50	7	5.56%
2.00	10	7.94%
Mais	4	3.17%

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Para a análise dos resultados de vulnerabilidade à seca foi padronizado pelas seguintes faixas de avaliação de sustentabilidade e resiliência hídrica propostas por Sadeghi & Hazbavi (2017): 0,81 a 1,0 – muito sustentável, balanço hídrico com superávit hídrico; 0,61 a 0,80 – sustentável, balanço hídrico equilibrado; 0,41 a 0,60 meio sustentável, balanço hídrico abaixo e aumento da demanda hídrica; 0,21 a 0,40 – insustentável, déficit hídrico e demanda hídrica elevada; 0,20 a 0 – muito insustentável, estresse hídrico e a capacidade de renovação hídrica afetada.

A resiliência (*Re*) está associada à duração das secas, quanto maior a duração média das secas, menor será a resistência às secas (HAZBAVI; SADEGHI, 2016). Indica o quanto a bacia pode voltar no seu estágio satisfatório, é a capacidade de elasticidade ao sair da seca até ter outra novamente ou sua incapacidade para resistir. Assim, para a bacia do Alto Descoberto foi de 0,29 está na faixa de insustentável com uma demanda hídrica elevada, o que faz chamar a atenção quanto ao uso e ocupação da cobertura do solo da bacia.

Segundo os cenários da modelagem de Rodrigues et al. (2020) implicam em um aumento na frequência de secas e maiores mudanças na vazão média mensal nos meses da estação seca - Junho, Julho e Agosto. Para a bacia do Alto Descoberto, não foi tão diferente, a exposição (*Ex*) à seca com 24% do período total a bacia esteve exposta às condições de seca e a frequência (*Fr*) foi de 83% de ocorrer eventos de seca por ano, o que coincide também com a sazonalidade climática da região (FRÉCCIA, 2020), porém a intensidade com mais amplitude por ter os níveis de precipitação nesses meses abaixo da média.

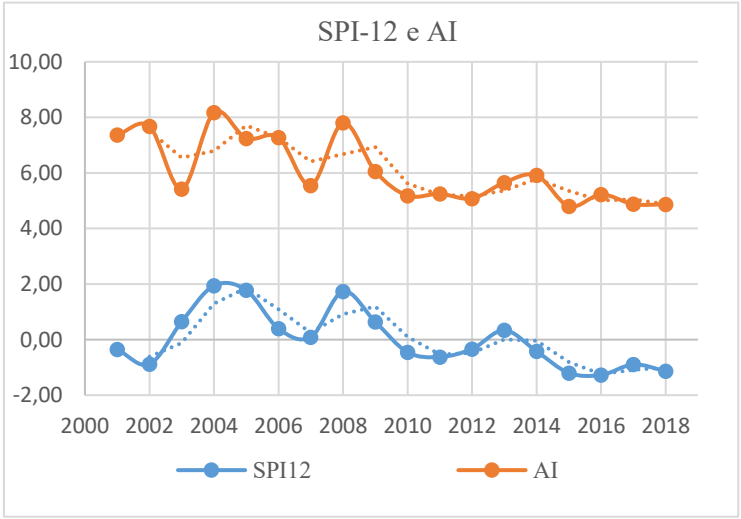
A vulnerabilidade (*Vu*) à seca é definida como esgotamento médio da água devido à seca, sendo medida com base na magnitude de IA e indica a probabilidade de dano de um evento de seca (HAZBAVI; SADEGHI, 2016). É um indicador que varia entre 0 a 1, cujo representa o grau de vulnerabilidade da região hidrográfica estudada, quanto mais próximo de 1, mais vulnerável à seca é a região (HAZBAVI; SADEGHI, 2016; SADEGHI; HAZBAVI, 2017). Assim, a bacia do Alto Descoberto variou de 0 a 0,75 ao longo de cada ano (Figura 7). Para o período de 19 anos, a bacia está vulnerável aos danos das secas por ter tido um resultado igual a 1, pois houve 15 eventos de seca (M) com duração de dois meses ou mais, e o somatório desses eventos foram iguais a 15,07.

Foi avaliada o comportamento da variância dos resultados de IPP-12 e IA foi realizado o teste de normalidade Shapiro-Wilk resultou na não normalidade dos dados ($p < 0,05$), portanto, os testes estatísticos seguintes foram escolhidos para dados não paramétricos. E o teste de Kruskal-Wallis resultou que há uma diferença estatisticamente significativas nas medianas ($p < 0,05$). Em seguida, realizou os testes Mann-Whitney e a correlação pelo Tau de Tau de Kendall entre eles (Quadro 2).

A hipótese nula seria que não existiria uma diferença significativa na dispersão dos valores de IPP-12 e IA, porém, o teste demonstrou que houve uma diferença significativa na variância nos valores obtidos pelos índices, já que o p_{valor} 3,22 $e^{-7} < 0,05$. E a correlação entre eles foi de 0,516, ou seja, apesar de diferirem entre si, há uma relação positiva entre os índices.

Quadro 2 - a) Gráfico do resultado do índice de aridez (IA) anual em laranja e IPP-12 em azul para o período de 2001 a 2018; b) resultado dos testes estatísticos: de normalidade Shapiro-Wilk, de comparação das medidas centrais Kruskal-Wallis, de variâncias Mann-Whitney e matriz de correlação pelo Tau de Kendall entre IPP-12 e AI.

a.



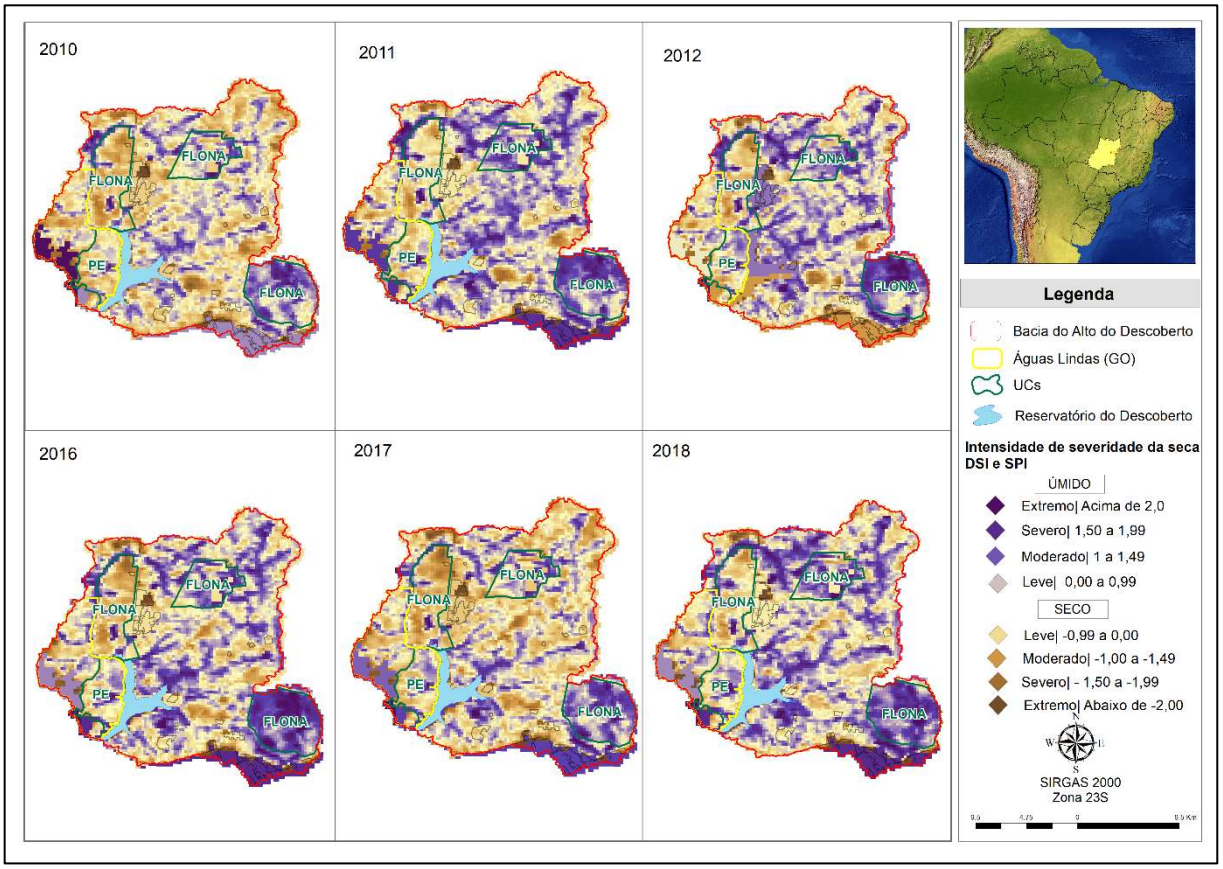
b.

Teste de normalidade Shapiro-Wilk		
	IPP-12	*AI*
W	0,97	0,86
p-valor	0,027	0,012
alpha	0,05	
Medianas	-0,34	5,60
Teste de Kruskal-Wallis		
U	26,27	
p-valor	$2{,}97e^{-7}$	
alpha	0,05	
Teste de Mann Whitney		
U	0	
p-valor	$3{,}23e^{-7}$	
Matriz de Correlação Tau de Kendall		
	IPP-12	*AI*
IPP-12	1	
AI	0.516	1
$p < 0.05$	0,002	

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Os anos que tiveram a mesma tendência no IPP-12 e no índice de aridez (IA) na bacia hidrográfica do Alto Descoberto com níveis abaixo da média e consecutivos foram: 2010, 2011 e 2012; e 2016, 2017 e 2018 (Figura 7). Com base na classificação de severidade da seca do Monitor de Secas (ANA, 2021) e Santos (2020) demonstra que os anos de 2010 a 2012 estavam na faixa de seca fraca (de -0,5 a -0,7) com indicativo em acarretar possíveis impactos para déficits hídricos persistente. Já para os anos de 2016 a 2018, a faixa de seca foi moderada (-0,8 a -1,2) com indício de reservatório com nível baixo e falta de água iminente e demonstra que tem uma tendência de escassez hídrica. Esse período foi justamente a da crise hídrica no Distrito Federal (MPDF, 2017).

Figura 7 - Mapa dos anos que tiveram a mesma tendência nos índices IPP-12 e IA.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Esses resultados corroboram com as previsões de um aumento de intensidade da seca, assinalando mudanças no regime hídrico sazonal dos estudos de cenários de vazão e secas nas bacias hidrográficas do bioma Cerrado. De acordo com Rodrigues *et al.*(2020) e Fréccia (2020), que mesmo com as incertezas das projeções simuladas nos modelos hidrológicos e climáticos, esses fornecem uma indicação de redução de disponibilidade de água na região. Além de salientar que o IPP captura a frequência de seca, usar apenas ele como base pode subestimar o impacto da seca nas bacias estudadas no Cerrado. E a importância de analisar o índice de aridez periodicamente, pois pode assessorar nas tomadas de decisão em políticas públicas para uma gestão de seca.

O efeito de estresse hídrico sobre a sustentabilidade da bacia hidrográfica depende da vulnerabilidade da bacia hidrográfica e de sua capacidade de se adaptar às mudanças. Mudanças nas características de precipitação e, como representados nos regimes indicados pela variação do IPP afetam as variabilidades naturais dos processos ecológicos e estado geral do meio ambiente da bacia hidrográfica. A partir dessas condições da bacia hidrográfica pode

definir medidas mitigadoras aos possíveis impactos, que promovam uma situação mais sustentável e evite estresse hídrico.

Esse estudo enfatiza a importância de analisar esses índices periodicamente por possibilitarem um panorama da variabilidade do déficit hídrico regional, pois pode assessorar nas tomadas de decisão em políticas públicas para uma gestão de secas – como por exemplo: acionar declarações de desastres e a decretações de emergência, auxiliar no zoneamento ambiental dos Planos Diretores de Ordenamento Territorial (PDOT) mais sustentável e planos de drenagem. Quanto a temporalidade do desenvolvimento dessa pesquisa, em 2012, a ANA criou o Monitor de Secas apenas para a região Nordeste e tem expandido gradativamente, disponibilizando arquivos *shapefiles* e relatórios mensalmente dos indicadores de seca – Índice de Precipitação Padronizado (IPP) e Índice de Aridez (IA). Apenas em 2018, este começou a cobrir a região Centro-Oeste. Contudo, para o Distrito Federal considera-se sem seca relativa, apesar da estiagem em julho.

4. CONCLUSÕES

A análise espaço-temporal da vulnerabilidade da seca na região da bacia hidrográfica do Alto Descoberto (DF) no período de dezenove anos (2001 a 2019), quanto a sua resiliência, vulnerabilidade e exposição à seca e seu balanço hídrico demonstrou que é uma metodologia eficaz para detectar mudanças nos eventos hidrológicos, principalmente aos extremos de precipitação para uma bacia hidrográfica. Além de necessitar apenas de duas entradas de dados, precipitação e evapotranspiração potencial.

No conjunto das análises demonstraram serem eficientes para identificar a capacidade da bacia de adaptar às mudanças, principalmente quanto ao seu processo de adaptação à escassez hídrica. E salienta a necessidade do monitoramento de seca por meio desses índices, pois esses têm a finalidade de mensurar a intensidade, a duração e a frequência desses eventos. O que torna essa metodologia aplicável em auxiliar as tomadas de decisões em relação a gestão hídrica, quanto a sua demanda e seu déficit hídrico regionais da bacia.

O uso da plataforma *Google Earth Engine* foi factível por facilitar o processamento de coleções com mais de 240 imagens para criar os indicadores IPP e ISS, necessitar apenas de um e-mail da Google e ser uma plataforma sem cobrança pelo uso dessas imagens. Contudo,

o desafio é saber o básico da linguagem de programação, saber como será a sua rotina nele e ter o escopo da análise bem definida. Assim, criar o *script* para estes indicadores dentro da bacia hidrográfica foi alcançado.

Essa pesquisa demonstrou que estudos de aridez e de seca com diferentes metodologias são recentes para a região Centro-Oeste, a partir de três anos atrás. Além de coincidir com o período da crise hídrica (2016 a 2018) e na política nacional de segurança hídrica iniciada em 2019 pela Agência Nacional de Águas (ANA). Esses estudos contribuíram para a compreensão da sazonalidade da seca e seus impactos para uma escala de uma bacia hidrográfica, diferente dos estudos até então publicados com escalas maiores.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo financiamento da bolsa de mestrado da primeira autora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADASA. **Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal - PGIRH - Volume I - Diagnóstico**. Relatório Final do PGIRH do Distrito federal. Brasília: Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal, 2012.

ADGER, N. Vulnerability. **Global environmental Change**, v. 16, p. 268–281, 2006.

ANA. **Monitor de Secas do Brasil**. 2021. Disponível em: http://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=7&ano=2021. Acesso em: 31 ago. 2021.

AQUINO, A. R.; PALETTA, F. C.; ALMEIDA, J. R. de. **Vulnerabilidade ambiental**. 1. ed. Sãi Paulo: Blucher, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.5151/9788580392425

BRASIL. **Áreas e Ações prioritárias para conservação, uso sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade brasileira**. Atualização da Portaria MMA Nº 9 de 23 de janeiro de 2007. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Climatic Classification of Köppen-Geiger For the State of Goias and Federal District. **Acta Geográfica**, v. 8, n. 16, p. 40–55, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.5654/actageo2014.0004.0016

CAVALCANTI, L. C. S. **Cartografia de paisagens: fundamentos**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2014.

CHEN, S.; ZHA, X.; BAI, Y.; WANG, L. Catena Evaluation of soil erosion vulnerability on the basis of exposure , sensitivity , and adaptive capacity : A case study in the Zhuxi watershed , Changting, Fujian Province, Southern China. **Catena**, v. 177, n. January, p. 57–69, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.036.

CUTTER, S. L. Vulnerability in Environmental Hazards. **Progress in Human Geography**, v. 20, n. 4, p. 529–539, 1996.

CUTTER, S. L. A ciência da vulnerabilidade : modelos , métodos e indicadores. **Revista Crítica de Ciências Sociais**, p. 59–69, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.4000/rccs.165.

DAVID, P. C. **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MODELOS HIDROLÓGICOS CONCEITUAIS EM 508 BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS**. 110 f. 2020. - Universidade Federal de Santa Catarina, [*s. l.*], 2020.

DIDAN, K. **MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006**. 2015. Disponível em: https://doi.org/https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006. Acesso em: 31 ago. 2020.

FRASER, E. D. G; SIMELTON, E; TERMANSEN, M. "Vulnerability hotspots": Integrating socio-economic and hydrological models to identify where cereal production may decline in the future due to climate change induced drought. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 170, p. 195–205, 2013.

FRÉCCIA, I. M. **AVALIAÇÃO DA ARIDEZ E DA SAZONALIDADE NOS BIOMAS BRASILEIROS**. 72 f. 2020. - Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.

FUCHS, S.; GLADE, T. Foreword: Vulnerability assessment in natural hazard risk-a dynamic perspective. **Natural Hazards**, v. 82, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11069-016-2289-x. Acesso em: 21 jan. 2021.

GONÇALVES, S. T. N.; JUNIOR, F. C. V.; SAKAMOTO, M. S.; SILVEIRA, C. S.; MARTINS, E. S. P. R. Índices e Metodologias de Monitoramento de Secas: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3 suppl, p. 495–511, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0102-77863630007.

GUEDES, R. V. de S.; MACEDO, M. J. H.; SOUZA, F. de A. S. Análise espacial de eventos de secas com base no índice padronizado de precipitação e análise de agrupamento. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, p. 55–65, 2012.

HAZBAVI, Z.; SADEGHI, S. H. R. Watershed Health Characterization Using Reliability–Resilience–Vulnerability Conceptual Framework Based on Hydrological Responses. **Land Degradation and Development**, v. 28, n. 5, p. 1528–1537, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1002/ldr.2680.

JOSEPH, J. Measuring vulnerability to natural hazards: a macro framework. **Disasters**, [*s. l.*], v. 37, n. 2, p. 185–200, 2013.

KOVAČEVIĆ-MAJKIĆ, J.; PANIĆ, M.; MILJANOVIĆ, D.; MILETIĆ, R. Vulnerability to natural disasters in Serbia: spatial and temporal comparison. **Natural Hazards**, v. 72, p. 945–968,

2014.

KUMAR, R.; MUSUUZA, J. L.; LOON, A. F. V.; TEULING, A. J.; BARTHEL, R.; BROEK, J. T.; MAI, J.; SAMANIEGO, L.; ATTINGER, S. Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator. **Hydrol. Earth Syst. Sci**, v. 20, p. 1117–1131, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.5194/hess-20-1117-2016. Acesso em: 12 jan. 2021.

LOPES, I.; LEAL, B. G. ÍNDICE DE ARIDEZ E TENDÊNCIA A DESERTIFICAÇÃO PARA ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NOS ESTADOS DA BAHIA E PERNAMBUCO. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 155–172, 2015.

MARTINS, E. S.; BAPTISTA, G. M. M. **Compartimentação Gomorfológica e Sistemas Morfodinâmicos do Distrito Federal**. Brasília, DF: SEMATEC/IEMA/MMA-SRH, 1998.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology. **American Metereological Society**, n. Boston, p. 179–184, 1993.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1–2, p. 202–216, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012

MOREIRA, A.; FONTANA, D.; KUPLICH, T.; CARDOSO, M. Dados Meteorológicos estimados em condições de clima subtropical e a relação com índices de vegetação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 6, p. 1075–1091, 2017.

MPDF. **Plano Integrado de Enfrentamento da Crise Hídrica**. 2017. Disponível em: www.mpdft.mp.br/portal/pdf/eventos/crisehidri%0Aca/PLANO-INTEGRADO-DEENFRENTAMENTO-%0ACRISE-HIDRICA_21-%0A2-2017.pdf/. Acesso em: 18 set. 2019.

MU, Q.; ZHAO, M.; KIMBALL, J. S.; MCDOWELL, N. G.; RUNNING, S. W. A remotely sensed global terrestrial drought severity index. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 94, n. 1, p. 83–98, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00213.1

NASCIMENTO, D. T. F.; NOVAIS, G. T. Clima do Cerrado : dinâmica atmosférica e características , variabilidades e tipologias climáticas. **Élisée - Revista de Geografia da UEG**, v. 9, n. 2, 2020.

PIANOSI, F.; BEVEN, K.; FREER, J.; HALL, J. W.; ROUGIER, J.; STEPHERSON, D. B.; WAGENER, T. Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. **Environmental Modelling and Software**, v. 79, p. 214–232, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008

PRADO, L. F.; WAINER, I.; YOKOYAMA, E.; KHODRI, M.; GARNIER, J. Changes in summer precipitation variability in central Brazil over the past eight decades. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 8, p. 4171–4186, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1002/joc.7065

REATTO, A.; MARTINS, E.; CARDOSO, E.; SPERA, S.; CARVALHO jr. O.; SILVA, A.; FARIAS, M. **Levantamento de reconhecimento de solos de alta intensidade do alto curso do Rio Descoberto DF/GO, escala 1:100.000**. Planaltina, DF, 2003. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAC-2009/26447/1/bolpd_111.pdf. Acesso em: 16 abr. 2021.

RODRIGUES, J. A. M.; VIOLA, M. R.; ALVARENGA, L. A.; MELLO, C. R.; CHOU, S. C.; OLIVEIRA, V. A.; UDDAMERI, V.; MORAIS, M. A. V. Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 5, p. 2511–2526, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1002/joc.6347

RODRIGUEZ, J. M. M.; SILVA, E. V.; CAVALCANTI, A. P. B. **Geoecologia das paisagens: uma visão geossistêmica da análise ambiental**. 3. ed. Fortaleza, CE: UFC, 2010.

RUNNING, S., MU, Q., ZHAO, M. **MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]**. 2017. Disponível em: https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006. Acesso em: 31 ago. 2020.

RUNNING, S.W.; MU, Q.; ZHAO, M.; MORENO, A. MOD16A3GF MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled Yearly L4 Global 500 m SIN Grid V006. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC**, p. 1–37, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A3GF.006

SADEGHI, S. H.; HAZBAVI, Z. Spatiotemporal variation of watershed health propensity through reliability- resilience-vulnerability based drought index (case study : Shazand Watershed in Iran) Science of the Total Environment Spatiotemporal variation of watershed health propensity t. **Science of the Total Environment**, v. 587–588, n. April 2018, p. 168–176, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.098

SANTOS, C. A. G.; NETO, R.M.B.; PASSOS, J.S.A.; SILVA, R. M. Drought assessment using a TRMM-derived standardized precipitation index for the upper São Francisco River basin, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 6, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10661-017-5948-9

SANTOS, K. M. S. **Avaliação da eficiência do monitor de secas para definição de secas em sergipe**. 148 f. 2020. - Universidade Federal de Sergipe, 2020.

SANTOS, M. **Metamorfose do espaço habitado: fundamentos teóricos e metodológicos da geografia**. 6. ed. São Paulo: Edusp, 2008.

SCARIOT, A.; SOUSA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. **Cerrado: Ecologia, Biodiversidade e Conservação**. Brasília: MMA, 2005.

SILVA, F. J. B. C. da. **Uso de Índices Físicos e de Sensoriamento Remoto para Quantificação da Seca e Aridez e Determinação da Susceptibilidade à Desertificação no Semiárido Pernambucano**. 227 f. 2020. - Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

SILVA, L. E. W.; MELO, K. R. M.; CHAVES, M. B. **Diagnóstico das secas em sub bacias do rio paraíba do meio no período 1963 - 1989**. Simpósio do Nordeste. Recife, Pernambuco: 2020.

SIMPSON, D. M.; HUMAN, R. J. Large-scale vulnerability assessments for natural hazards. **Natural Hazards**, v. 47, p. 143–155, 2008. Disponível em: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11069-007-9202-6.pdf. Acesso em: 21 jan. 2021.

SOUSA, F. A. S.; MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. V. S.; SILVA, V. P. R. O Índice de Precipitação Padronizada (IPP) na identificação de extremos de chuvas e secas na bacia do rio Paraguaçu (BA) The Standardized Precipitation Index (SPI) in identifying extreme rainfall and droughts in the Paraguaçu River Basin (BA). **Ambiciência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 12, n. 2, p. 13, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.5935/ambiencia.2016.02.14

TIGKAS, D.; VANGELIS, H.; TSAKIRIS, G. DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. **Earth Science Informatics**, v. 8, n. 3, p. 697–709, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y. Acesso em: 7 fev. 2021.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2017.

TROPICAL RAINFALL MEASURING MISSION (TRMM). **TRMM (TMPA/3B43) Rainfall Estimate L3 1 month 0.25 degree x 0.25 degree V7**, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.5067/TRMM/TMPA/MONTH/7. Acesso em: 31 ago. 2020.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFGRS, 2005.

TUNDISI, J. G; **Recursos Hídricos no século XXI**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2011.

VEETTIL, A. V.; KONAPALA, G.; MISHRA, A. K.; LI, H. Sensitivity of Drought Resilience-Vulnerability- Exposure to Hydrologic Ratios in Contiguous United States. **Journal of Hydrology**, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.015

VOLPATO, G. L.; BARRETO, R. E. **Estatística Sem Dor**. 2. ed. Botucatu: Best Writing, 2016.

WANG, L.; KOTANI, A.; TANAKA, T.; OHTA, T. Assessment of drought condition using remotely sensed drought severity index and its correlations with soil moisture product in Inner Mongolia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 141, n. 1–2, p. 715–728, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00704-020-03242-z

WILHITE, D. A.; VANYARKHO, O. V. Chapter 18 Drought: Pervasive Impacts of a Creeping Phenomenon. *In*: DROUGHT MITIGATION CENTER FACULTY PUBLICATIONS. 71. ed. Nebraska, USA: University of Nebraska-Lincoln, 2000. p. 15. *E-book*.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geostatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2013.