

TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADOS NA ANÁLISE DE SECA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS: ESTUDO DE CASO NA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO SERRA AZUL - MG

Débora Joana Dutra

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Instituto de Geociências, Departamento de Cartografia
Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Belo Horizonte, MG, Brasil
deborajoana11@ufmg.br

Marcos Antônio Timbó Elmiro

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Instituto de Geociências, Departamento de Cartografia
Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Belo Horizonte, MG, Brasil
mtimbo@ufmg.br

RESUMO

As recorrentes pressões antrópicas no ambiente têm ocasionado diversas alterações nos ciclos naturais, dentre eles o ciclo hidrológico. A principal consequência das mudanças do ciclo hidrológico está associada ao agravamento da seca e à presença de eventos de escassez hídrica. Nesse aspecto, o objetivo desse trabalho é verificar a eficácia de dados do sensor MODIS para análise de seca meteorológica e hidrológica na região da sub-bacia do ribeirão Serra Azul (MG) por meio de aplicação do índice de condição de vegetação (ICV). Para isso, realizou-se o cálculo do ICV e análises estatísticas com dados meteorológicos, hidrológicos e relatórios climatológicos entre os anos de 2013-2018 com o intuito de identificar a abrangência de seca na sub-bacia. Os resultados permitiram identificar que a presença de eventos externos e aspectos regionais contribuiu para o agravamento da seca. Além disso, verificou-se que a umidade do solo pode ter influenciado o armazenamento de água na região de estudo. Através dos resultados obtidos, verificou-se que o ICV possui capacidade significativa para identificar eventos de seca na região de estudo, confirmando-se por estatísticas nas regressões e correlações das variáveis.

Palavras-chave: Índice de Condição de Vegetação. Sensoriamento Remoto. MODIS. Seca meteorológica. Seca Hidrológica.

REMOTE SENSING TECHNIQUES APPLIED TO DROUGHT ANALYSIS IN HYDROGRAPHIC BASINS: CASE STUDY IN THE SUB-BASIN OF SERRA AZUL STREAM – MG

ABSTRACT

Recurrent anthropic pressures in the environment have caused several changes in natural cycles, including the hydrological cycle. The main consequence of changes in the hydrological cycle is associated with the worsening of drought and the presence of water scarcity events. In this aspect, the objective of this work is to verify the effectiveness of MODIS sensor data for meteorological and hydrological drought analysis in the Serra Azul stream sub-basin (MG) through application of the vegetation condition index (VCI). For this, the calculation of the VCI and statistical analyzes were carried out with meteorological, hydrological data and climatological reports between the years 2013-2018 in order to identify the extent of drought in the sub-basin. The results made it possible to identify that the presence of external events and regional aspects contributed to the worsening of the drought. In addition, it was found that soil moisture may have influenced water storage in the study region. Through the results obtained, it was verified that the ICV has a significant capacity to identify drought events in the study region, confirmed by statistics in the regressions and correlations of the variables.

Keywords: Vegetation Condition Index. Remote sensing. MOD. Meteorological drought. Hydrological Drought.

INTRODUÇÃO

As crescentes demandas por recursos naturais para satisfazer as diversas atividades antrópicas como produção de energia, expansão das cidades e atividades agropecuárias têm proporcionado alterações nos ciclos naturais do ambiente. Atualmente, diversos estudos têm buscado entender as

consequências dessas alterações por meio de pesquisas relacionadas às mudanças do uso do solo. Tais estudos têm sido aplicados, principalmente, na relação entre aumento da população e uso do solo (BRIASSOULIS, 2019), geração de cenários futuros e impactos hidrográficos (BOONGALING; ESLAVA; LANSIGAN, 2018), fenômenos naturais e qualidade da água (SHEN et al., 2015) e conservação de biomas brasileiros (MELLO; TOPPA; LEITE, 2016).

No cenário dos ciclos naturais, as florestas são as principais componentes do meio ambiente impactadas pelo uso inadequado dos recursos naturais, resultando em alteração na dinâmica florestal e no consequente aumento do desmatamento em regiões de transição do espaço rural, devido a atividades agropecuárias. A redução de cobertura vegetal pode causar, em casos graves, o aumento da intensidade de eventos de seca e de escassez hídrica em bacias hidrográficas. Esses fenômenos ocorrem em diversas regiões do mundo, em razão da diminuição da precipitação natural durante um determinado período. Sua principal característica está associada à temporalidade, sendo inerente a fatores climáticos como altas temperaturas, ventos fortes e baixa umidade (WILHITE, 1992; WILHITE e SVOBODA, 2000).

De acordo com Sausen e Lacruz (2015), a seca pode ser classificada em quatro tipologias, sendo elas: meteorológica, hidrológica, agrícola e socioambiental. A seca meteorológica está associada à variação da precipitação em uma determinada região ao longo de uma série temporal e acontece, principalmente, quando a quantidade de precipitação ocorre abaixo do esperado devido a variações de entrada e saída do ciclo hídrico (FERNANDES *et al.*, 2009; MACKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993; SAUSEN; LACRUZ, 2015). A seca hidrológica é associada à deficiência de volume hídrico de uma determinada região, sendo medida pelos níveis freáticos de lagos e reservatórios e pelo volume de rios. Sua análise é feita principalmente por meio de entradas (precipitação) e saídas (evaporação) do ciclo hidrológico de uma determinada região (BLAIN; BRUNINI, 2005; SAUSEN; LACRUZ, 2015; WMO, 2006). A seca agrícola ocorre quando a disponibilidade hídrica prejudica o desenvolvimento de culturas em uma determinada região, sendo associada com a combinação das secas meteorológicas e hidrológicas (FERNANDES *et al.*, 2009; MISHRA; SINGH, 2010; PANU; SHARMA, 2014; SAUSEN; LACRUZ, 2015). A seca socioambiental está associada às questões de escassez hídrica oriundas da seca hidrológica, onde sua principal característica está vinculada com a deficiência de bens ou serviços para a população, ou seja, depende do processo de oferta e demanda de recursos para a sua identificação (FERNANDES *et al.*, 2009; SANTOS, 1998; SAUSEN; LACRUZ, 2015; SOUSA-JÚNIOR; SAUSEN; LACRUZ, 2011).

No contexto das ciências ambientais, um dos principais desafios associados à análise de seca está relacionado à complexidade de identificação de sua duração. Isso se deve, principalmente, às questões relativas ao ciclo hidrológico, pois o fenômeno da seca é dependente de fatores associados a processos de entrada e saída de água, como evapotranspiração, precipitação, umidade do solo e águas subterrâneas (TANNEHILL, 1947). Assim, é de grande importância o desenvolvimento de metodologias que possibilitem o dimensionamento da ocorrência da seca, tendo em vista os problemas econômicos, sociais e ambientais dela decorrentes que afetam a população.

Atualmente, diversos estudos mundiais têm focado nas temáticas da seca, como na Europa Central e Oriental (VAN LANEN et al., 2016); Ásia (BANIYA et al., 2019); Oceania (BEECHAM; RAZZAGHMANESH, 2015); América do Norte (UTTARUK; LAOSUWAN, 2017); e América do Sul (GOMES; BERNARDO; ALCÂNTARA, 2017). Em grande parte desses estudos, as principais variáveis e ferramentas utilizadas para identificação da influência da seca em uma região estão associadas ao uso de dados de vegetação, tendo em vista que a produção primária líquida (NPL), que influencia na produção da biomassa terrestre, é diretamente afetada pela duração de eventos de seca (RAO et al., 2017; WU et al., 2016).

Devido a questões que envolvem a hidrometeorologia, estudos apontam que as mudanças do uso da terra podem contribuir para uma maior intensidade do evento de seca em algumas localidades. Assim, o monitoramento constante da seca e da forma como as atividades antrópicas atuam no espaço geográfico é fundamental para a criação de medidas mitigadoras para as consequências desse fenômeno, especialmente na previsão de futuros eventos de escassez hídrica em bacias hidrográficas. Dessa forma, o desenvolvimento de tecnologias, tais como as advindas de sensoriamento remoto, permitem a observação do espaço e das mudanças do uso do solo por meio de análises geoestatísticas. Através das informações provenientes dos sensores remotos, é possível identificar a influência das variáveis ambientais e das ações antrópicas no ambiente (ANDERSON et al., 2016; WEST; QUINN; HORSWELL, 2019).

Neste universo de muitas ferramentas e dados do sensoriamento remoto, as análises de séries temporais são utilizadas de forma direta no monitoramento de seca por meio da aplicação de índices que utilizam a resposta espectral de objetos para verificação de mudanças ocorridas em um

determinado ambiente (DECHANT; MORADKHANI, 2014, 2015). Grande parte dos índices associados a estudos de seca, como o Índice de Condição de Vegetação (ICV) e o Índice de Gravidade de Seca (IGS), utilizam os dados oriundos da resposta espectral da vegetação como base algébrica para o seu cálculo, sendo, portanto, determinados como índices de vegetação. De acordo com Bonifacio, Dugdale e Milford (1993) e Formaggio e Sanches (2017), através da resposta espectral captada pelos sensores no monitoramento e pela aplicação de formulações matemáticas, os índices de vegetação permitem analisar o comportamento da vegetação ao longo das mudanças de uso do solo ocorridas em uma determinada região.

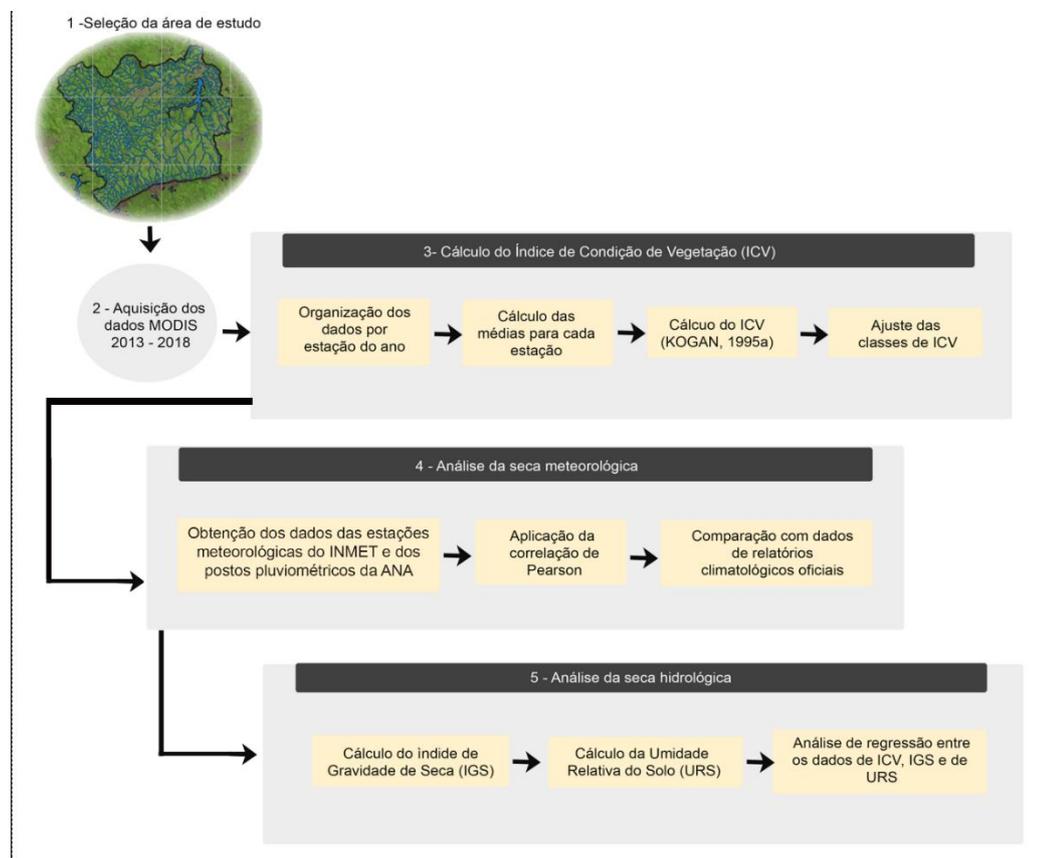
De modo similar, os índices de seca utilizam esses dados espectrais e realizam aplicações algébricas que possibilitam o monitoramento e mapeamento da seca ao longo da mudança sazonal das variáveis climatológicas de uma região. Nesse tipo de tecnologia, o sensor MODIS tem sido bastante utilizado nos estudos em áreas agrícolas (DUFT; PICOLI, 2018), e em áreas de pastagens (CUNHA et al., 2017).

Nesse cenário, o objetivo do trabalho é verificar a eficácia e viabilidade do sensor MODIS para análise de seca meteorológica e hidrológica na região da sub-bacia do ribeirão Serra Azul por meio de aplicação do Índice de Condição de Vegetação (ICV). Para esse propósito, realizou-se uma análise comparativa entre dados de Índice de Gravidade de Seca (IGS) e de Umidade Relativa do Solo (URS) a fim de verificar a eficácia no monitoramento de seca na região e o uso de dados de relatórios climatológicos oficiais para verificar a influência de eventos externos e aspectos regionais na dinâmica de extensão de seca na região de estudo.

METODOLOGIA

A metodologia aplicada no trabalho é composta por cinco fases principais (Figura 1), a saber: caracterização da área de estudo; obtenção dos dados de sensoriamento remoto; cálculo do Índice de Condição de Vegetação (ICV); análise da seca meteorológica e análise da seca hidrológica.

Figura 1 - Fluxograma geral da metodologia aplicada no estudo de caso.

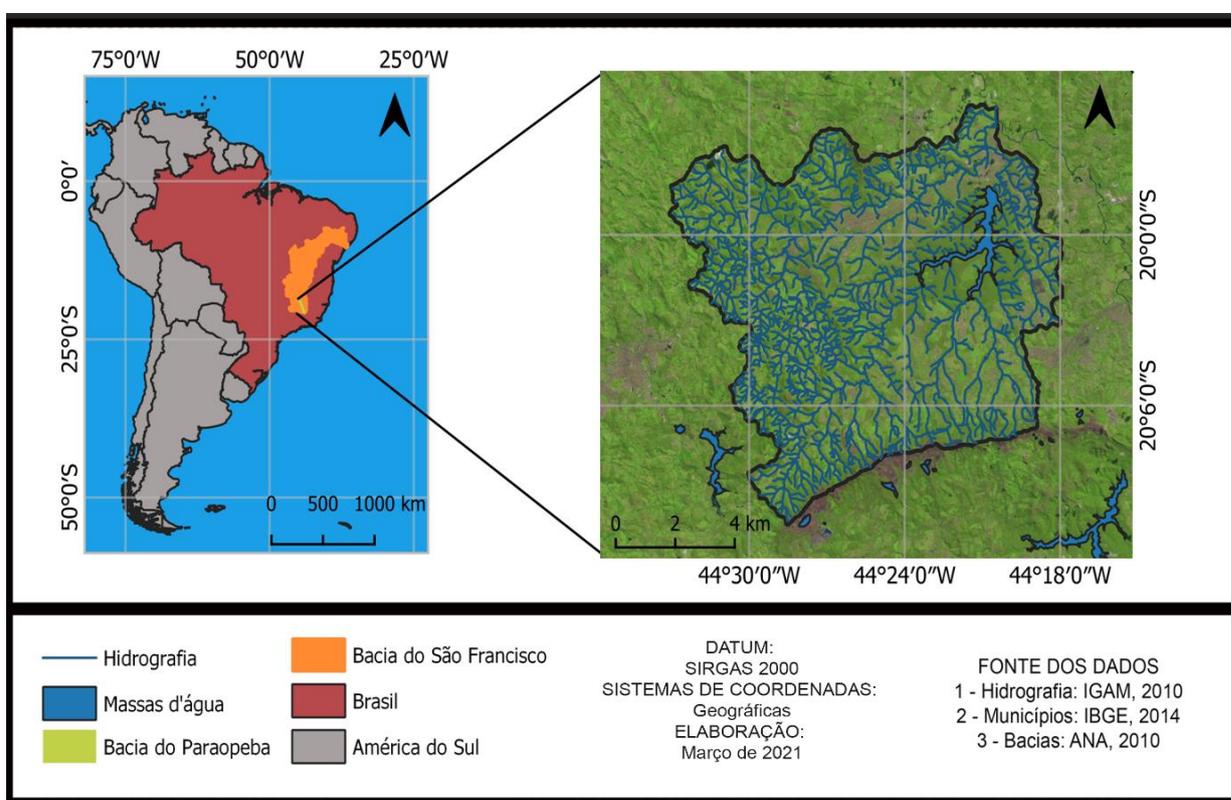


Fonte - Os autores.

Área de estudo: sub-bacia do ribeirão Serra Azul

Situada na Zona Tropical Brasil Central Subquente, a região da sub-bacia do ribeirão Serra Azul está localizada no alto curso do rio São Francisco, na bacia do rio Paraopeba, e apresenta uma característica climática semiúmida com duração de períodos de seca entre quatro a cinco meses. A região possui 447,83 km² de área e abrange os municípios de Mateus Leme, Igarapé, Juatuba e Itaúna, sendo localizada entre os paralelos de 20° 15' e 20° 00' de latitude Sul e os meridianos 44° 15' e 44° 35' de longitude Oeste (Figura 2). A sub-bacia possui uma intensa intervenção de atividades antrópicas, onde se destacam processos relativos a agropecuárias, atividades de mineração, expansão urbana, além de outros. As regiões florestais são classificadas em cerrado e mata atlântica com sua principal abrangência no reservatório de abastecimento de água da região que leva o mesmo nome da sub-bacia (DNAEE, 1981; IBGE, 2019; DUBREUIL *et al.*, 2018; DUTRA; BRIANEZI; COELHO, 2020; DUTRA; ELMIRO; GARCIA, 2020).

Figura 2 - Localização geográfica e hidrografia da sub-bacia do ribeirão Serra Azul.



Fonte - Os autores.

Dados de sensoriamento remoto

Para realização da análise de abrangência de seca na região de estudo, foram utilizados dados derivados do sensor MODIS (resolução espacial 250m) referentes aos produtos MOD13Q1 (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI e Enhanced Vegetation Index – EVI), MOD11A2 (temperatura de superfície) e MOD16 ET/PET (evapotranspiração). Para o estudo, utilizaram-se os dados de NDVI, como proposto na pesquisa de Dutra *et al.* (2021), para o cálculo do índice de condição de seca (ICV). Todos os dados foram organizados em uma resolução temporal de 16 dias de acordo com as estações do ano para toda série temporal analisada, referente aos anos de 2013 a 2018, utilizando como referência a escala de dias julianos ou dias contínuos. Os dados do sensor MODIS usados na área de estudo foram obtidos a partir do site do *United States Geological Survey* (USGS).

A metodologia de Kogan (1995a) adotada para identificação da variação de seca requer o cálculo das médias dos dados temporais para cada estação do ano ao longo de todo período analisado, conforme a Equação 1,

$$\bar{IS} = \frac{1}{E} \sum_{i=1}^E ISi \quad (1)$$

Onde

E = número de imagens temporais dentro de cada estação do ano;

\bar{IS} = média de um conjunto N de dados numéricos temporais do índice de vegetação considerado; e

ISi = valores temporais do índice de vegetação considerado.

Cálculo do Índice de Condição de Vegetação (ICV)

A partir das imagens de médias (IS), resultantes da Equação 1, usando os dados do projeto MOD13Q1, calculou-se a imagem de média dos valores máximos e a imagem de média dos valores mínimos para todos os verões, outonos, invernos e primaveras dos seis anos analisados. Com base na metodologia proposta por Kogan (1995a), o ICV foi calculado para obtenção das ocorrências de seca distribuídas ao longo do período analisado (Equação 2). Os valores de ICV variam entre zero e cem, na razão de quanto maior a influência da seca em uma região, menor o valor apresentado pelo índice (KOGAN, 1995a).

$$ICV = \frac{\bar{IV}_{estação} - \bar{IV}_{min.estação}}{\bar{IV}_{max.estação} - \bar{IV}_{min.estação}} * 100 \quad (2)$$

Onde

$\bar{IV}_{estação}$ = a média, por estação do ano, do NDVI;

$\bar{IV}_{min.estação}$ = a média de valores mínimos da estação do ano para a série total de seis anos; e

$\bar{IV}_{max.estação}$ = média de valores máximos da estação do ano para a série total de seis anos.

Os dados de ICV resultantes da Equação 2 foram reclassificados de acordo com as classes estabelecidas por Bhuiyan e Kogan (2010) e adaptadas para regiões brasileiras por Covele (2011), conforme apresentado na Tabela 1, resultando em cinco classes que se adaptam ao bioma da área de estudo (seca extrema; seca severa; seca moderada; seca suave; e sem ocorrência de seca).

Tabela 1 - Intervalos de classes dos valores do ICV e sua correspondente classificação de seca.

VALORES DE ICV (%)	CLASSIFICAÇÃO DE SECA
X < 20	Seca extrema
20 ≤ X < 40	Seca severa
40 ≤ X < 60	Seca moderada
60 ≤ X < 80	Seca suave
X ≥ 80	Sem ocorrência de seca

Fonte - Adaptado de Bhuiyan e Kogan (2010) e Covele (2011).

Análise da seca meteorológica

A seca meteorológica está diretamente relacionada com as variações do ciclo hidrológico, como diminuição da precipitação, aumento de temperaturas e diminuição das zonas de umidades. Dessa forma, sua análise envolveu três etapas 1) Obtenção dos dados das estações meteorológicas; 2) Aplicação da correlação de Pearson para verificar a influência das variáveis meteorológicas no ICV; e

3) Comparação com dados de relatórios climatológicos. Segue uma breve descrição dos pontos fundamentais de cada etapa da análise de seca meteorológica.

Na etapa 1, os dados das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e dos postos pluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA) foram utilizados para fins de verificação da influência das variáveis meteorológicas na dinâmica de expansão da seca delimitada pelo ICV. A análise envolveu três tipos de dados: temperatura do ar, evapotranspiração e pluviosidade. Devido à falta de estações dentro da região de estudo foram utilizados os dados de estações de regiões adjacentes (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2 - Estações meteorológicas do INMET.

CÓDIGO	ESTAÇÃO	CIDADE DE LOCALIZAÇÃO
86821	Rola Moça-A555	Ibirité
86799	Cercadinho-F501	Belo Horizonte
86800	Pampulha-A521	Belo Horizonte
86798	Florestal-A535	Florestal

Fonte: Os autores

Tabela 3 - Postos pluviométricos da ANA.

CÓDIGO	ESTAÇÃO	CIDADE DE LOCALIZAÇÃO
1944007	Fazenda Escola	Florestal
2044002	Itaúna – Montante	Itaúna
2044041	Fazenda Laranjeiras – Jusante	Itaúna
2044020	Calambau	Itaúna
2044026	Fazenda Coqueiros	Itaúna
2044043	Estiva	Mateus Leme
2044052	Jardim	Mateus Leme
2044054	Serra Azul	Mateus Leme
2044019	Fazenda Vista Alegre	Mateus Leme
2044024	Fazenda Curralinho	Mateus Leme
2044053	Escola de Veterinária	Mateus Leme
1944027	Juatuba	Mateus Leme
1944026	Barro Preto	Mateus Leme
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	Juatuba
2044016	Fazenda Benedito Chaves	Itatiaiuçu
2044008	Melo Franco	Brumadinho

Fonte - Os autores.

A etapa 2, referente à aplicação da correlação de Pearson consiste em uma análise estatística da probabilidade de ocorrência de variação entre duas variáveis X e Y com base em um par de N observações de uma determinada amostra (DAVIES; CHATFIELD, 1990). O objetivo da aplicação dessa técnica nos dados da bacia foi verificar e selecionar o melhor índice de vegetação (NDVI ou EVI) que as variáveis meteorológicas conseguem explicar para análise do fenômeno de seca na região.

Utilizou-se o software RStudio para realizar a correlação das variáveis meteorológicas para cada imagem da série temporal analisada, 2013 a 2018. Foram usadas as imagens dos valores NDVI e de EVI. A correlação de todos os valores dos pixels das imagens foi calculada pela Equação 3, proposta por Pearson (1982) e Pearson, Fischer e Inman (1994).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

Onde

r = coeficiente de correlação de Pearson;

\bar{x} = média amostral da variável x ;

\bar{y} = média amostral da variável y .

Análise da seca hidrológica

A seca hidrológica tem origem na deficiência do volume de água superficial e subterrânea disponível, sendo associada à disponibilidade hídrica de rios e níveis freáticos de lagos, lagoas e reservatórios. Normalmente ocorre quando há longo período de ausência de precipitação, porém não existe uma relação direta entre a quantidade de precipitação e o fenômeno. Dessa forma, sua análise foi composta de três etapas 1) Cálculo do Índice de Gravidade da Seca (IGS); 2) Cálculo da Umidade Relativa do Solo (URS); e 3) Análise de regressão entre os dados de índice de condição de vegetação, índice de gravidade de seca e de umidade do solo. Segue uma descrição dos pontos importantes de cada etapa da análise de seca hidrológica.

Na etapa 1, referente ao cálculo do Índice de Gravidade da Seca (IGS) utilizou-se a metodologia proposta por Mu et al. (2013) e os dados MODIS dos projetos MOD16 ET/PET e MOD13Q1. Para o cálculo de $Z_{ET/PET}$ (valores padronizados de ET/PET), foram utilizados os dados de ET/PET que correspondem à divisão dos dados de evapotranspiração real e potencial de evapotranspiração; $\overline{ET/PET}$ que é a média de longo prazo (2013 a 2018) da evapotranspiração; e $\sigma_{ET/PET}$ que é o desvio padrão da evapotranspiração (Equação 4). De modo similar, os dados de Z_{NDVI} (valores padronizados de NDVI) foram calculados utilizando as variáveis NDVI; \overline{NDVI} que corresponde à média de longo prazo (2013 a 2018) de NDVI; e σ_{NDVI} que é o desvio padrão do NDVI (Equação 5).

$$Z_{ET/PET} = \frac{ET/PET - \overline{ET/PET}}{\sigma_{ET/PET}} \quad (4)$$

$$Z_{NDVI} = \frac{NDVI - \overline{NDVI}}{\sigma_{NDVI}} \quad (5)$$

Após o cálculo, realizou-se a soma dos valores padronizados (Z) de ET/PET ($Z_{ET/PET}$) e de NDVI (Z_{NDVI}), conforme demonstrado pela Equação 6. Por fim, para obtenção dos dados do índice de gravidade de seca (IGS), Equação 7, foram utilizadas as variáveis de média de longo prazo do conjunto de dados (\bar{Z}); soma dos valores padronizados (Z); e desvio padrão dos valores padronizados (σ_Z).

$$Z = Z_{ET/PET} + Z_{NDVI} \quad (6)$$

$$IGS = \frac{Z - \bar{Z}}{\sigma_Z} \quad (7)$$

Na etapa 2, referente ao cálculo da Umidade Relativa do Solo (URS) utilizou-se a metodologia proposta por Zhan, Qin e Wang (2004) que foi aplicada em regiões brasileiras por Lopes et al. (2011). Foram utilizados os dados do sensor MODIS referentes ao projeto MOD11A2 e a Equação 8 para o cálculo do índice de umidade do solo a partir de dados de temperatura de superfície (IUS_{TS}). Após a aquisição dos dados, separaram-se os valores máximos da temperatura de superfície para cada estação do ano do período de estudo (TS_{max}); os valores mínimos da temperatura de superfície para cada estação do ano do período de estudo (TS_{min}); e os dados de temperatura de superfície para cada pixel da imagem (TS).

$$IUS_{TS} = \frac{TS_{max} - TS}{TS_{max} - TS_{min}} \quad (8)$$

Para o cálculo do índice de umidade do solo a partir de dados de NDVI (IUS_{NDVI}), foram utilizados os dados de NDVI do projeto MOD13Q1 e a estrutura matemática representada pela Equação 9. Após a aquisição dos dados, separaram-se valores máximos de NDVI para cada estação do ano do período de estudo ($NDVI_{max}$); os valores mínimos de NDVI para cada estação do ano do período de estudo ($NDVI_{min}$); e os dados de NDVI para cada pixel da imagem (NDVI).

$$IUS_{NDVI} = 1 - \frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (9)$$

O índice médio de umidade do solo (IUS) foi calculado por meio das médias aritméticas entre os resultados dos índices a partir de temperatura de superfície (IUS_{TS}) e o índice a partir de NDVI (IUS_{NDVI}), conforme demonstrado pela Equação 10. Por fim, para obtenção dos dados de umidade relativa do solo (URS), os resultados do IUS foram divididos pelo índice de umidade do solo máximo (MAX_{IUS}), de acordo com a metodologia proposta por Zhan, Qin e Wang (2004) e Lopes et al. (2011). Os dados são obtidos em formato de porcentagem, portanto é necessária a multiplicação do resultado pelo valor 100, conforme demonstrado pela Equação 11.

$$IUS = \frac{IUS_{TS} + IUS_{NDVI}}{2} \quad (10)$$

$$URS = \frac{IUS}{MAX_{IUS}} \times 100\% \quad (11)$$

A etapa 3, referente à análise de regressão entre os dados de ICV, IGS e IUS, com o objetivo de comparação da capacidade de cada índice em identificar períodos de seca na sub-bacia do ribeirão Serra Azul, consistiu em uma análise de tendência apresentada entre as variáveis, por meio de regressão linear usando os dados para cada estação do ano ao longo da linha temporal analisada (2013 a 2018). Para isso, realizou-se uma análise entre o ICV e o IGS a fim de verificar se os dados apresentam a mesma tendência, ou seja, se as regiões de seca apresentam aspecto similar entre os índices. Além disso, para verificar qual dos índices possui melhor capacidade de identificar esse fenômeno, realizou-se a análise de regressão com os dados de umidade para analisar como as mudanças de armazenamento de água do solo podem influenciar em cada índice.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

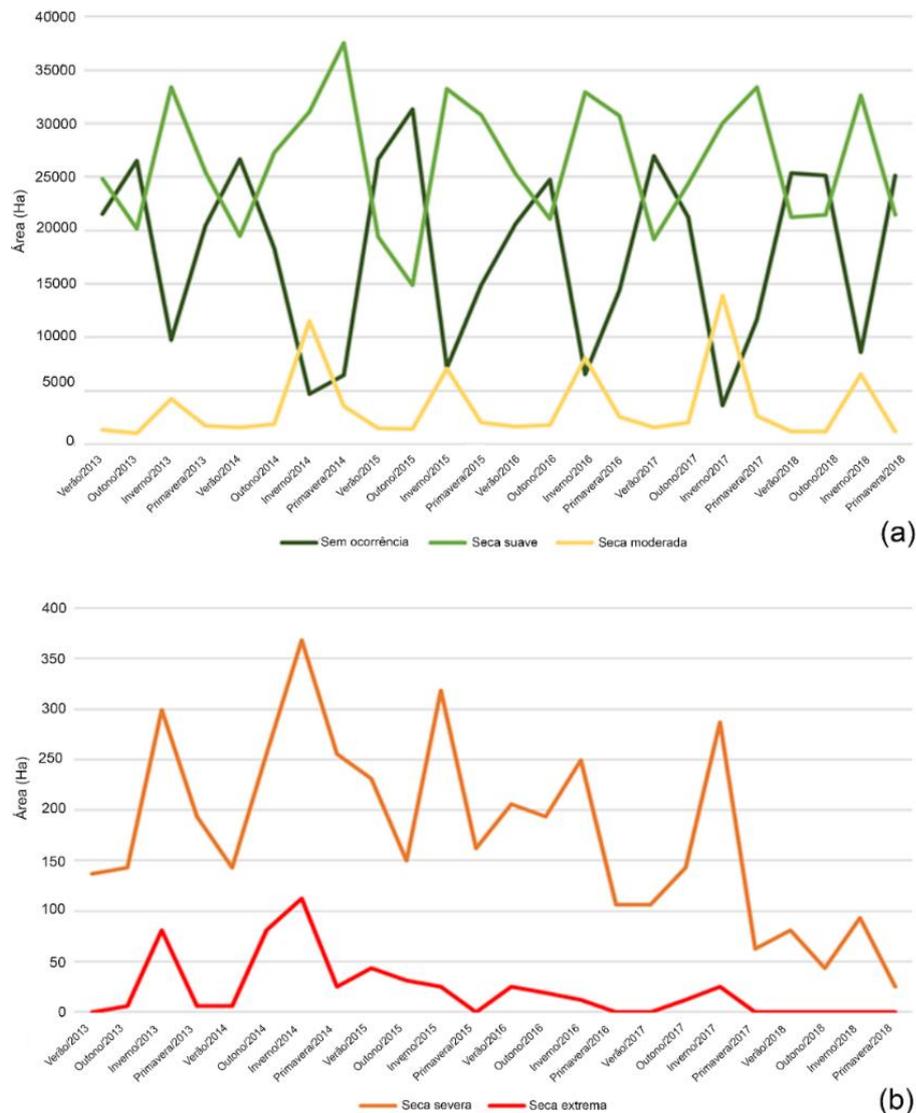
Seca meteorológica

Os resultados de análise da seca meteorológica são apresentados e discutidos enfatizando três tópicos sequenciais, a saber: Análise da dinâmica espacial e temporal da seca por meio do Índice de Condição de Vegetação (ICV); Análise da correlação entre o ICV e os dados meteorológicos; e Análise da influência de eventos externos e aspectos regionais na dinâmica da seca baseada em relatórios climatológicos oficiais. Embora apresentados e discutidos de forma sequencial para facilitar a leitura, os resultados e as discussões desses tópicos são complementares e integram um grupo concordante.

- Análise da dinâmica espacial e temporal da expansão da seca por meio do Índice de Condição de Vegetação (ICV)

O cálculo do ICV permitiu identificar a variação sazonal da seca ao longo da região da sub-bacia do ribeirão Serra Azul (Figuras 3 e 4). As análises realizadas permitiram identificar que, para todas as classes de seca, as estações de inverno e outono foram aquelas que apresentaram os menores valores de ICV e, conseqüentemente, uma maior extensão do agravamento da seca. Em relação às classes sem ocorrência de seca, seca suave e seca moderada (Figura 3), foi possível identificar que a maior parte da área de estudo foi caracterizada na classe seca suave. Além disso, nos períodos de primavera e verão foi possível verificar uma relação na qual, se os valores de seca moderada e seca suave diminuem, há um aumento das áreas sem ocorrência de seca.

Figura 3 - Variação temporal da área (ha) ao longo da série temporal analisada, onde (a) refere-se às classes de seca moderada, seca suave e sem ocorrência de seca apresentada pelo ICV e (b) às classes de seca severa e seca extrema apresentada pelo ICV ao longo da região de estudo.



Fonte - Autores.

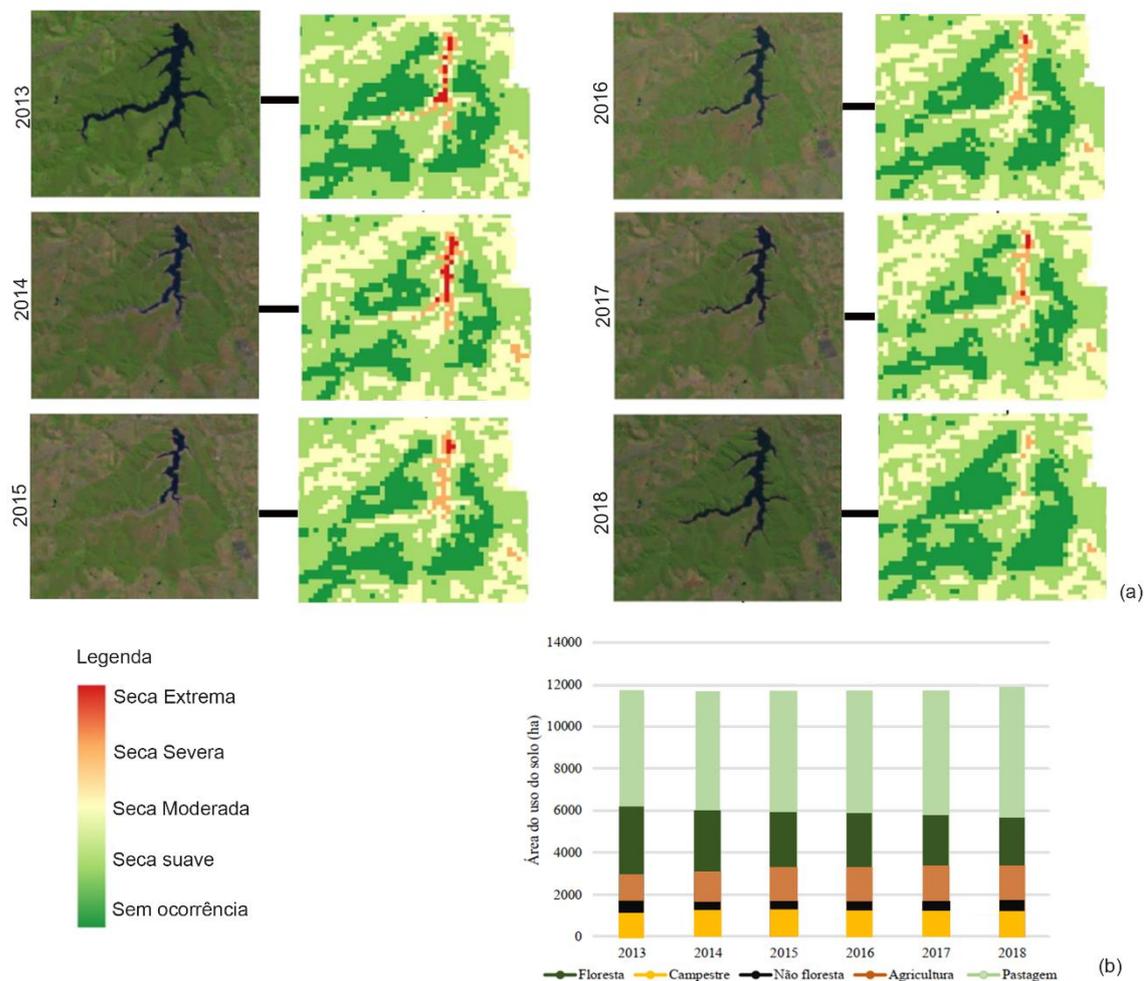
As classes de seca severa e seca extrema na região de estudo (Figura 3) apareceram em grande parte entre os verões de 2014 a 2016, coincidindo com o período de crise hídrica na sub-bacia, oficialmente declarada pelas autoridades locais. Em relação à classe de seca severa, nos períodos em que as regiões apresentaram valores de áreas maiores que 148 ha, verificou-se a presença de regiões de seca extrema na área de estudo. Os anos de 2014 e 2015 foram aqueles que apresentaram as maiores extensões de seca extrema ao longo da série histórica. Esse tipo de variação sazonal também foi encontrada em outras regiões de estudo, como demonstrado no estudo de Uttaruk e Laosuwan (2017), permitindo estabelecer que à medida que o valor de ICV diminui, aumenta a extensão de áreas de seca na região, apresentando um agravamento no período compreendido de 2014 a 2016.

Os resultados encontrados foram corroborados em estudos realizados em regiões agrícolas por Kamble et al. (2019) e Eyoh, Okeke e Ekpa (2019), permitindo demonstrar a influência das chuvas na variação do vigor vegetativo de uma região rural. Nesse aspecto, quanto maior o armazenamento de água na estrutura vegetal, menor a possibilidade da vegetação ser afetada por eventos de seca e,

consequentemente, maior o valor de ICV. De acordo com Yulistya, Wibowo e Kusratmoko (2019), considerando a variação da estiagem advinda da falta de chuvas, o ICV possui a capacidade de demonstrar a pior e a melhor condição de seca ao longo de um determinado período. Conforme Baniya et al.(2019), a variação da extensão das áreas das secas indicada pelo ICV pode apresentar diferentes tendências. Assim, conforme ocorre a expansão da seca devido à variação sazonal, o valor do ICV tende a apresentar menores valores ao longo da área de estudo, como na região do reservatório Serra Azul (Figura 4a).

Os resultados mostraram que a aplicação do ICV permite o controle e manutenção do avanço de áreas de seca em sub-bacias, principalmente quando associado a mudanças de uso do solo (Figura 4b). Estudos correlatos, como os apresentados por Cunha et al. (2017) e Leivas et al. (2014), identificaram que o ICV pode servir como uma ferramenta para analisar diferentes aspectos da seca em regiões tropicais devido a sua propriedade de conseguir explorar diversas condições de estresse hídrico em diferentes tipologias de paisagens.

Figura 4 - Exemplo de variação de seca aplicado pelo ICV na região do reservatório Serra Azul (a) e variação do uso do solo ao longo de toda região de estudo (b).



Fonte - Os autores.

- Análise da correlação de Pearson entre o ICV e os dados meteorológicos

O ICV apresentou uma correlação com variáveis meteorológicas exibindo valores entre 0.54 e 0.83 (Tabela 4). A precipitação apresentou a menor correlação (0.54), que corresponde a uma relação moderadamente positiva de acordo com a escala apresentada por Pearson (1982) e Paranhos *et al.*

(2014). A umidade relativa do ar apresentou uma correlação de 0.67, parecida com a da precipitação. Para a variável evapotranspiração, foi observada a maior correlação com o valor 0.83, caracterizada como fortemente positiva. Em relação à temperatura do ar foi encontrada uma correlação fortemente positiva (0.75), permitindo inferir que o valor de ICV tende a aumentar, na área de estudo, na medida em que a temperatura do ar e a evapotranspiração da região aumentam. Frente às mudanças climáticas, as alterações das relações entre os dados meteorológicos têm sofrido bastante interferências de pressões antrópicas, associadas principalmente à supressão da vegetação nativa (ANDERSON *et al.*, 2015; HONDA; DURIGAN, 2017; SANQUETTA *et al.*, 2018; SUN; LOCKABY, 2012). No aspecto do ciclo hidrológico, Dutra (2021) demonstra que a maior correlação entre temperatura e evapotranspiração se deve ao fato que se alterações antrópicas ocorrem na região de estudo, a temperatura e a quantidade de evapotranspiração presentes irão influenciar na umidade do ar e na consequente formação de nuvens de precipitação na região de estudo. Dessa forma, a quantidade de vegetação nativa na região pode influenciar na quantidade de água que sai do sistema (por meio da evapotranspiração da superfície terrestre) e na regulação do volume hídrico da bacia, uma vez que a diminuição de formação de nuvens de precipitação ocasiona uma menor entrada de água no sistema e consequentes eventos de seca na bacia hidrográfica.

Tabela 4 - Correlação entre os dados meteorológicos e o ICV ao longo da série temporal analisada (2013-2018).

RELAÇÃO COM O ICV	CORRELAÇÃO DE PEARSON (r)
Precipitação	0.54
Umidade relativa do ar	0.67
Temperatura do ar	0.75
Evapotranspiração	0.83

Fonte - Os autores.

As interpretações dos resultados obtidos mostraram que o aumento da variação da umidade relativa do ar, precipitação e temperatura do ar podem auxiliar no aumento da evapotranspiração da vegetação, causando uma diminuição das áreas de seca delimitadas pelo ICV. Isso se deve ao fato de que as variações de entrada e saída do sistema do ciclo da água impactam o volume hídrico da região e podem proporcionar o aumento e a diminuição de eventos de seca na região de estudo, conforme corroboram os estudos tratados a seguir. De acordo com Lima (2008) e Villela e Mattos (1975), o aumento da temperatura proporciona a evaporação das diferentes tipologias de água presentes na superfície terrestre se transformando em nuvens e aumentando a umidade relativa do ar de uma determinada região. No decorrer do processo, a umidade relativa do ar é transformada em precipitação, servindo como entrada de água dentro do ciclo hidrológico. Van Lanen *et al.* (2016) justificam que a seca meteorológica é diretamente afetada pela diminuição da entrada de água no sistema do ciclo da água e a não ocorrência desse tipo de seca depende das condições ideais de temperatura, umidade e evaporação. Para região de estudo, Dutra (2021), Dutra *et al.* (2021), Neves (2005) e Neves, Versiani e Rodrigues (2007) argumentam que nas estações de inverno e outono a região já apresenta uma tendência natural para diminuição da entrada de precipitação dentro do ciclo hidrológico cuja a duração é de 4 a 5 meses, sendo classificada de acordo com IBGE (2019) como uma região de clima semi-úmido. Entretanto, devido ao deficit de precipitação e alterações de temperatura e de evaporação no ano de 2015 na região de estudo, identificado por Minas Gerais (2015), a entrada de volume de água dentro do ciclo hidrológico da bacia apresentou uma diminuição ocasionando eventos de escassez hídrica associados à seca presente na região. Esse processo associado aos estudos da literatura corroboram com o resultado do trabalho indicando a seca diretamente associada as alterações das variáveis meteorológicas em uma determinada região.

Os resultados encontrados foram também corroborados em diversos estudos internacionais, principalmente com o enfoque em secas e estiagens, como em regiões de monções chinesas, conforme Liang *et al.* (2017). Tais estudos demonstraram que as variações sazonais das secas podem apresentar

diferenças conforme as características regionais de um determinado local. Além disso, em regiões sul-americanas, estudos como os de Zambrano *et al.* (2016) e Gomes *et al.* (2019) demonstraram que o ICV apresenta uma correlação significativa com dados meteorológicos, podendo servir como ferramenta para análises em regiões impactadas pela seca.

- Análise da influência de aspectos regionais na dinâmica da seca baseada em relatórios climatológicos oficiais

As análises dos relatórios climatológicos permitiram identificar que fatores externos e aspectos regionais podem ter exercido influência na variação de seca na sub-bacia do ribeirão Serra Azul, corroborando os resultados encontrados na relação entre ICV e dados meteorológicos. Foi verificado que nos anos de escassez hídrica, oficialmente declarada, compreendidos entre 2014 a 2016, as passagens de massas de ar, como a tropical atlântica, influenciaram na presença ou ausência de precipitação, bem como, no aumento da temperatura, umidade relativa do ar e evapotranspiração da região de estudo (MINAS GERAIS, 2015).

Identificou-se que a variação sazonal influencia no aumento ou diminuição dos valores das variáveis meteorológicas (Figura 5). Verificou-se que no período de transição entre as estações de outono e inverno, as variáveis atingiram seus valores mínimos, caracterizando a influência do período seco na região de estudo. No período que antecedeu a escassez hídrica da bacia, ano de 2015, identificou-se o menor valor de precipitação total na região de estudo, de tal modo que seu aumento foi registrado apenas na transição da primavera para o verão de 2016. Em relação à evapotranspiração, observou-se que o período de alta, entre as estações de primavera e verão, coincidiu com o aumento da precipitação na região de estudo. As análises das variações de temperatura indicaram que o aumento da temperatura tende a elevar os valores de evapotranspiração, contribuindo para a formação de nuvens e da umidade relativa do ar, favorecendo a precipitação na área de estudo. A umidade relativa do ar, que consiste no vapor de água presente na atmosfera, está associada diretamente à temperatura do ar e à evaporação de uma superfície, podendo sofrer alterações conforme a atuação das massas de ar e a quantidade de cobertura vegetal em uma determinada região (ANTUNES; CUPOLILLO, 2018; LIMA, J. M.; CUPOLILLO, 2018; LIMA, W. DE P., 2008; NIMER, 1979; VILLELA; MATTOS, 1975).

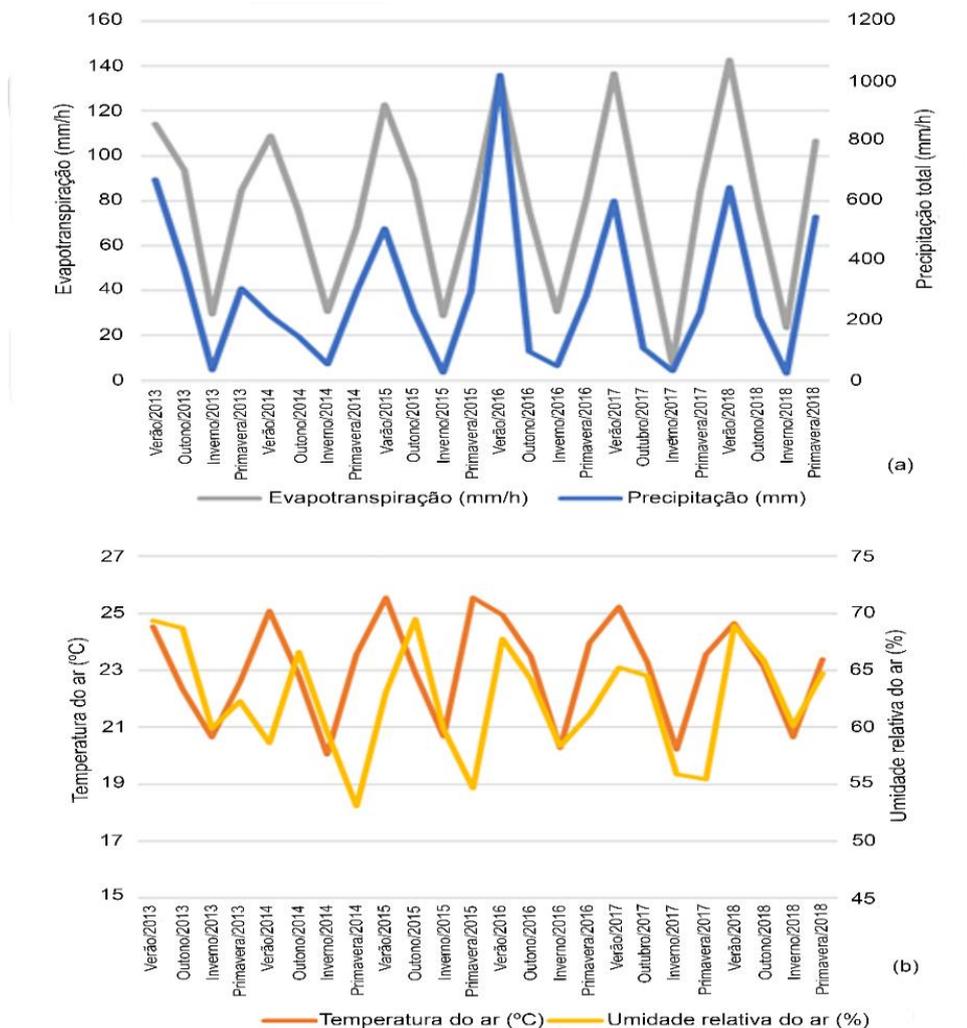
Nos resultados encontrados, a umidade relativa do ar foi a única variável que não acompanhou a tendência de alta nas estações de chuva e de baixa nas estações de seca. De acordo com Dutra (2021), as mudanças do uso do solo na região de estudo advindas da supressão da vegetação podem ter contribuído para as alterações de umidade relativa do ar, uma vez que a região apresenta intensa atividade agrícola, expansão urbana e trabalhos de mineração. Essas ações têm prejudicado o ciclo hidrológico da sub-bacia e ocasionado uma diminuição do volume de armazenamento máximo de água. A vegetação contribui para o aumento da umidade relativa do ar por meio do processo de evapotranspiração. Assim a supressão vegetal ocasionada pela mudança do uso do solo pode causar uma diminuição da evapotranspiração do ciclo hidrológico, ocasionando uma diminuição da umidade do ar e consequente atraso do período de chuvas dentro da sub-bacia. Dessa forma, os resultados encontrados permitiram identificar que a umidade relativa do ar está diretamente relacionada a fatores externos e aspectos regionais, como a atuação de massas de ar e a supressão da vegetação nativa, que podem estar influenciando no aumento ou na diminuição dessa variável na sub-bacia.

Ainda no contexto das análises realizadas nos relatórios climatológicos oficiais, INMET (2020) e INFOCLIMA (2020), verificou-se que entre junho e outubro de 2013, devido à passagem de massas de ar quente nos primeiros meses do ano e à atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), o Brasil apresentou temperaturas acima do normal climatológico. Além disso, a atuação da Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) influenciou na presença de umidade relativa do ar e precipitação da região durante o ano de 2013, principalmente nas estações de chuvas (meses de janeiro a março na região de estudo). De acordo com INFOCLIMA (2020), a baixa atuação das ZCAS e ZCOU no ano de 2015 não permitiram a produção de chuvas e nem a consequente recuperação das reservas hídricas da região de estudo.

O não aparecimento dessas zonas de convergência sobre a região resultou no surgimento de episódios de escassez hídrica na região Sudeste do Brasil no ano de 2015, principalmente pela falta de atuação

da massa tropical atlântica na região, que ocasionou ausência de eventos pluviométricos e queda da umidade relativa do ar. Esse quadro crítico obrigou a criação de medidas públicas, como a expedição de portarias, para declarar episódios de escassez hídrica em reservatórios de abastecimento de água. Na região metropolitana de Belo Horizonte, a região de estudo foi declarada na condição de escassez hídrica por meio da portaria elaborada por Minas Gerais (2015). Em Minas Gerais, estudos como os de Sacramento Neto, Escobar e Silva (2010), Pallotta e Nakazato (2015), Lima e Cupolillo (2018) e Antunes e Cupolillo (2018), identificaram que a ZCAS e a ZCOU são responsáveis por levar a umidade relativa do ar e provocar o fenômeno de chuvas intensas em Minas Gerais, sendo importantes para o regime hídrico das bacias hidrográficas. De acordo com Jardim e Moura (2018) a atuação da ZCOU e da ZCAS influenciou no regime de chuvas da região e no consequente aumento da precipitação nos anos de 2016 a 2017.

Figura 5 - Alteração das variáveis meteorológicas ao longo das estações na série temporal analisada (2013-2019), onde (a) variação da evapotranspiração e precipitação e (b) temperatura do ar e umidade relativa do ar.



Fonte - Os autores.

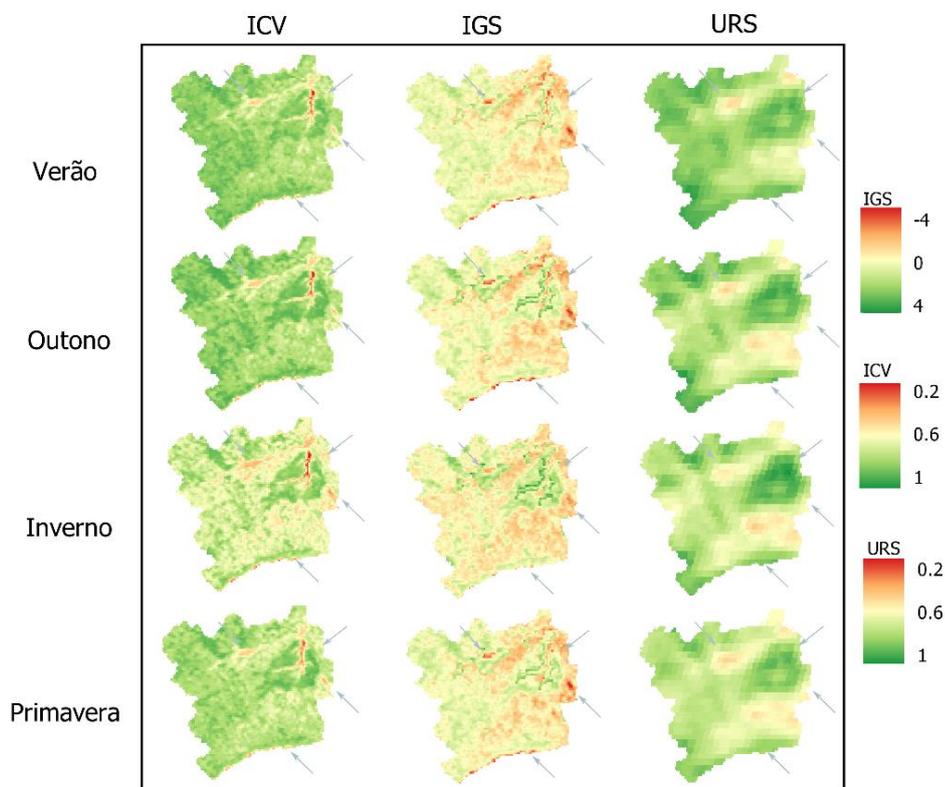
Seca hidrológica

Na análise da seca hidrológica, estudos da literatura como Zhang, Mu e Huang (2016), permitem identificar que as diferentes formas da variação da resposta espectral da vegetação auxiliam na

delimitação da gravidade de seca de uma região. Nesse contexto, é necessário o estudo criterioso das diferenças entre as metodologias aplicadas para definição do índice mais adequado a ser utilizado como forma de diagnóstico de eventos climáticos em uma determinada região de estudo.

As análises realizadas na região de estudo permitiram identificar a variação do fenômeno de seca ao longo das estações do ano (Figura 6). O ICV e o IGS se mostraram capazes de identificar as variações sazonais que ocorreram na região de estudo (setas na imagem da Figura 6). Os menores valores de ICV e de IGS foram associados às áreas com menor quantidade de vegetação, relacionadas com a presença de área urbana, reservatório e mineração. A análise dos mapas permitiu verificar que o ICV consegue perceber mais mudanças na região do que o IGS em áreas agrícolas, uma vez que ao longo das estações do ano a variação dos intervalos de IGS foi menor, quando comparado com o ICV.

Figura 6 - Variação da média geral das variáveis ICV, IGS e URS ao longo do período de estudo (2013-2018).



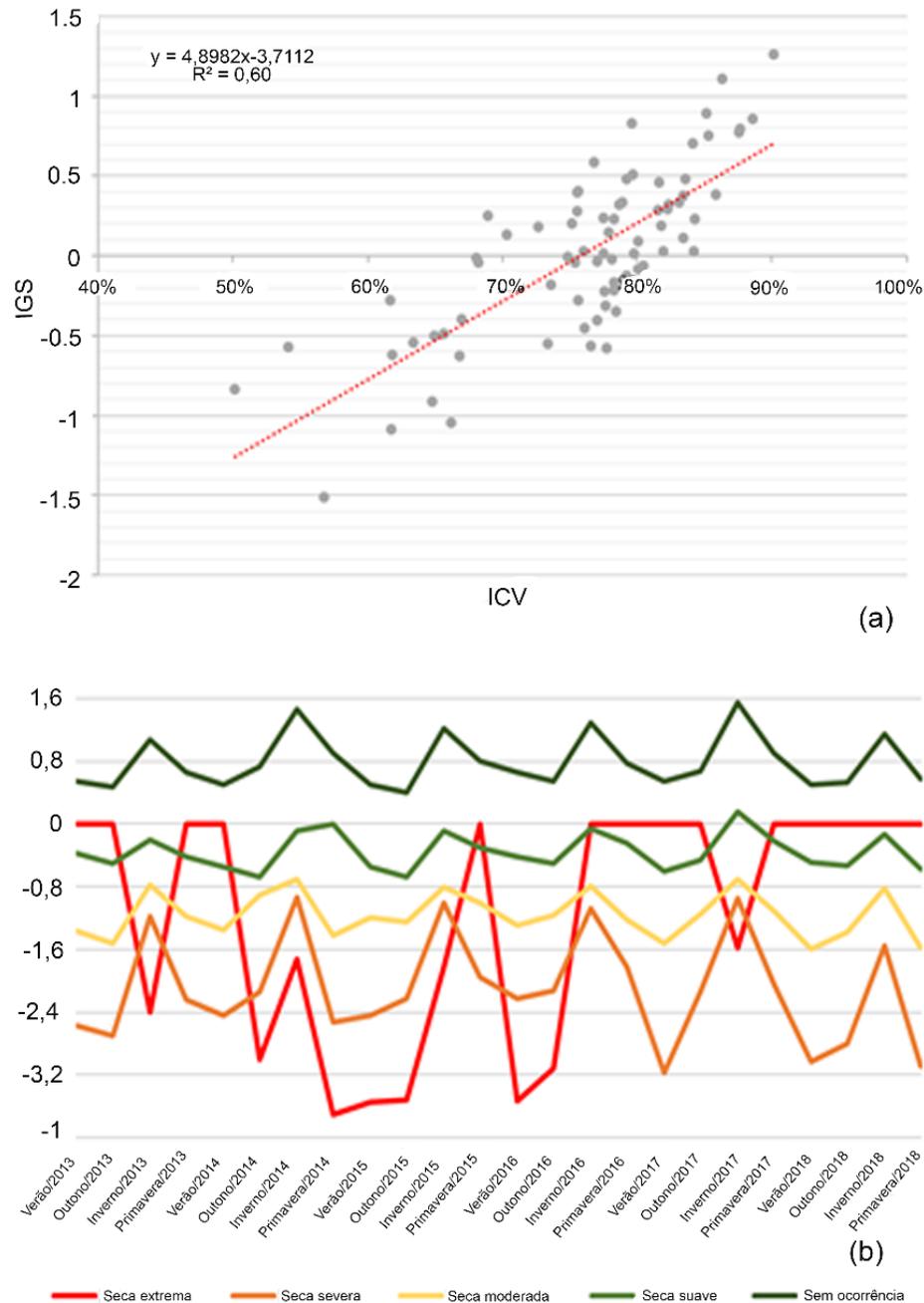
Fonte - Os autores.

As análises de umidade do solo indicaram que a região consegue armazenar uma grande quantidade de água ao longo das estações chuvosas (verão e primavera), permitindo a utilização dessa reserva nos meses de seca (outono e inverno). A umidade pode interferir nas variações de seca ao longo da região de estudo, esse aspecto fica destacado principalmente quando os resultados de umidade são comparados com os dados de ICV. Isso explica-se porque quanto maior a quantidade de manchas de baixa umidade na região, maior a probabilidade do aumento da quantidade de áreas de seca na sub-bacia.

O modelo de regressão estabelecido entre os dados de IGS e ICV (Figura 6a) permitiu identificar uma influência moderada positiva de $R^2 = 0.60$. Assim, demonstra-se que as duas variáveis conseguem delimitar a dinâmica de extensão da seca na bacia hidrográfica de forma parecida, sendo oportuno um aprofundamento de estudos para investigar as origens dessas diferenças apresentadas em cada variável. Essa relação pode ser corroborada por meio da análise média dos valores de IGS ao longo das classes de ICV (Figura 6b). Na medida que o ICV apresenta um agravamento das suas classes de

seca, os valores de IGS tendem a diminuir na região de estudo, possibilitando verificar essa relação diretamente proporcional entre as duas variáveis.

Figura 7 - Gráfico das relações entre o ICV e o IGS para todo tempo de estudo analisado, onde (a) é o modelo de regressão linear com coeficiente de determinação $R^2 = 0,60$, e (b) são os valores médios de IGS ao longo das estações do ano da série temporal analisada por toda a extensão de abrangência das classes de ICV na sub-bacia do ribeirão Serra Azul.

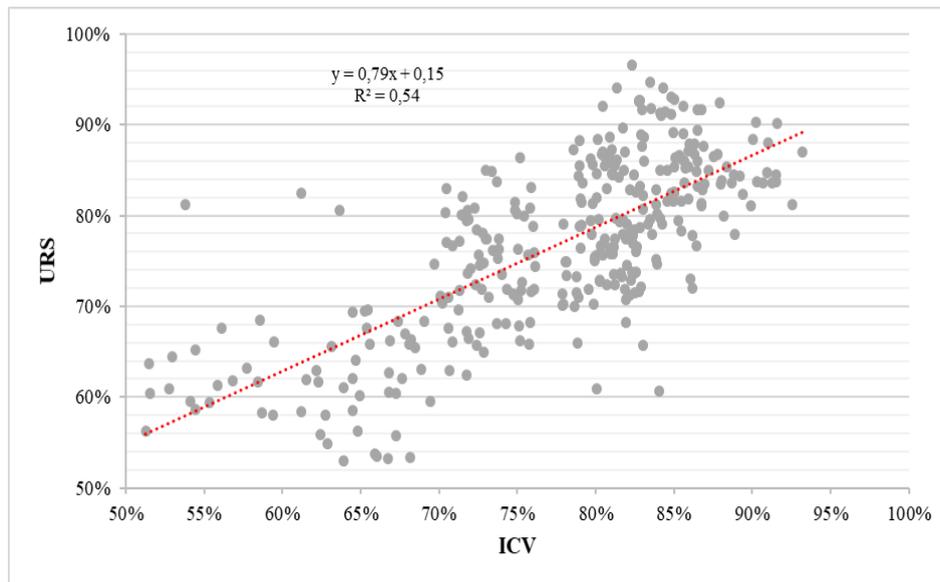


Fonte - Os autores.

O modelo de regressão entre os dados de índice de seca e de umidade do solo (Figura 8) indicou que o ICV apresenta uma melhor relação regressiva (0.54) se comparado com o IGS (0.30). Nesse aspecto, os resultados indicam que o ICV possui uma maior capacidade de identificar mudanças sazonais de umidade do que o IGS, pois quanto maior o valor de umidade do solo na região, menor será a

probabilidade de ocorrência de seca. Essa condição se explica em razão de o ICV apresentar valores mais baixos quando o URS diminui. O IGS não consegue estabelecer essa relação proporcional quando comparado com o URS, visto que os valores de IGS variam ao longo das mudanças apresentadas pelo URS.

Figura 8 - Análise de regressão entre os índices de condição de vegetação e de umidade relativa do solo (modelo de regressão linear, coeficiente de determinação $R^2 = 0,54$).



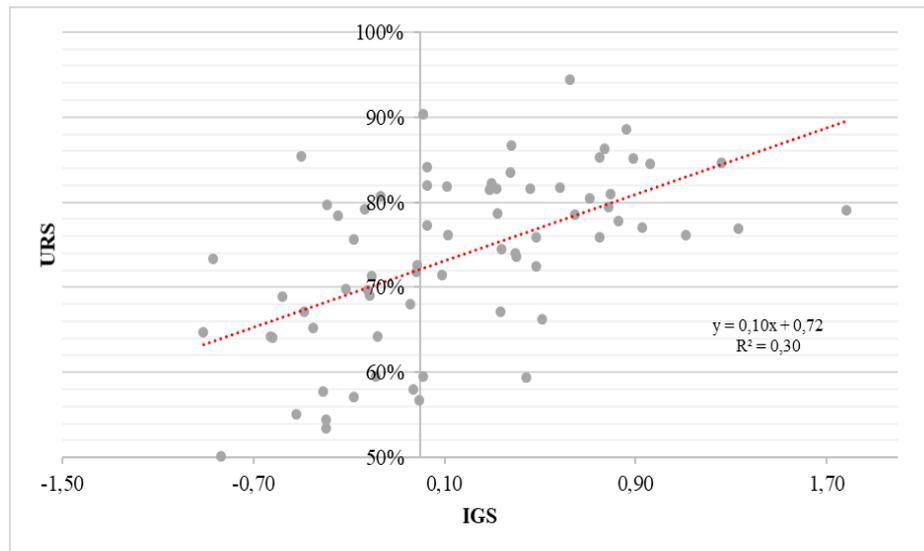
Fonte - Os autores.

Os índices aplicados na delimitação da dinâmica de seca, representados pelo ICV e IGS, possibilitam o mapeamento da variação da umidade, associado principalmente à reserva hídrica, ao longo da variação sazonal. Nesse aspecto, Zhang, Mu e Huang (2016), em seus estudos de seca utilizando índices de vegetação, relatam que esses índices possibilitam a análise do fenômeno e possuem a capacidade de associá-lo ao crescimento vegetativo por meio da correlação com dados de umidade do solo.

Os dois índices utilizados permitem identificar como a vegetação responde à disponibilidade hídrica de uma região, principalmente em relação a questões associadas ao ciclo hidrológico. De acordo com Kogan (1995b), na medida em que os valores de ICV diminuem, maior a influência da seca em uma determinada região. Nesse mesmo aspecto, Chandrasekar et al. (2017) demonstra que quando o IGS apresenta valores negativos, o ambiente tende a apresentar condições de seca mais severas que o normal, sendo visto como um quadro extremo do fenômeno.

Uma forte razão para a relação moderadamente positiva, de $R^2 = 0,6$, entre o ICV e o IGS pode ser explicada pelo fato dos índices incluírem em sua estrutura algébrica o uso do NDVI. Dessa forma, é possível inferir que a inclusão da variável evapotranspiração, utilizada no cálculo de IGS, influencia na relação entre as variáveis inibindo uma relação fortemente positiva, ou seja, acima de 0.8. Quando comparados, os resultados encontrados corroboram a pesquisa de Cunha et al. (2019), onde se concluiu que o uso da variação espectral da vegetação pode ser aplicado para o monitoramento de seca e que o uso de índices como ICV e IGS são eficazes para identificação do evento de seca. De acordo com o estudo, a relação de valor 0.6 entre as variáveis permite inferir que as duas metodologias podem ser similarmente aplicadas para o mapeamento de seca, uma vez que a tendência de variação dos valores apresentados é moderadamente positiva, ou seja, os pixels que apresentaram uma maior influência da seca no ICV também apresentaram o mesmo comportamento para o IGS.

Figura 9 - Análise de regressão entre os índices de gravidade de seca e de umidade relativa do solo (modelo de regressão linear, coeficiente de determinação $R^2 = 0.30$).



Fonte - Os autores.

Em análises relacionadas ao ciclo hidrológico, os estudos de umidade do solo são de grande importância para delimitação da metodologia mais adequada para monitoramento de evento de secas, pois permitem a identificação de variações sazonais, períodos secos e de extrema influência do fenômeno de seca. Estudos como o de Rossato et al. (2017), identificaram que o uso de dados de umidade de solo permitem identificar a variação do evento de seca. No Brasil, foi possível identificar o agravamento do fenômeno da seca no ano de 2015.

Quando comparado com os dados de umidade do solo, o ICV possui uma maior capacidade de se relacionar com as variações de reserva hídrica, apresentando uma relação moderadamente positiva se comparado com o IGS. O valor de 0.54 permite verificar uma relação diretamente proporcional entre essas variáveis. Esses resultados foram corroborados em estudos como os de Eyoh; Okeke e Ekpa (2019) e Jiao et al. (2016), que demonstraram que o ICV possui capacidade de identificar a variação de umidade e de estresse hídrico ao longo das diferentes classes, servindo como subsídio para o monitoramento e criação de planos de ação em bacias hidrográficas.

O valor de 0.30 significa que a relação do IGS com a umidade do solo não apresenta maior proporcionalidade se comparado com o ICV. Os resultados se demonstraram diferentes dos apresentados por Gebeyehu et al. (2019), Chandrasekar et al. (2017) e Zhang, Mu e Huang (2016), onde foi relatado que o IGS possui uma relação fortemente positiva com a umidade do solo, de modo que quanto maior o valor do IGS, maior a quantidade de reserva hídrica em uma região.

De acordo com Mu et al. (2013), Mu, Zhao e Running (2011, 2013) e Phillips et al. (2009), dados de sensoriamento remoto estão frequentemente associados a incertezas substanciais que causam distorções estatísticas, principalmente relacionadas à resolução espacial de imagens empregadas. Assim, é comum a presença desses fatores de imprecisão em estudos climatológicos. Nesse aspecto, Zhang, Mu e Huang (2016), destacam que resultados de regressão acima de 0.4 já conseguem demonstrar capacidade significativa da variável para o monitoramento de secas.

Através dos resultados apresentados e da analogia com estudos nacionais e internacionais, foi possível concluir que, para região de estudo, o IGS não consegue identificar de forma eficaz as variações de umidade do solo quando comparado com os resultados do ICV ressaltando-se questões associadas à resolução das imagens utilizadas, assim como, a escala dos produtos gerados em função da extensão da área de estudo. As diferenças apresentadas pelas variáveis ao serem comparadas com a umidade do solo, podem também estar associadas a questões relacionadas à forma como o resultado final é apresentado pelo índice ou em relação a especificidades da região de estudo onde a técnica é aplicada.

Um dos motivos associados ao bom resultado apresentado pelo ICV pode ser atribuído ao fato de que o índice apresenta um processo de normalização tal como ocorre no cálculo do URS. Dessa forma, quando comparado com o IGS, que possui resultados pontuais, o ICV tende a apresentar uma melhor resposta estatística. Assim, a análise de regressão permite uma compreensão preliminar de qual índice deve ser utilizado, sendo necessário o uso de outras metodologias ou análises de fatores que podem auxiliar na relação entre seca e umidade do solo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados encontrados permitiram identificar que o ICV possui uma significativa interação com dados meteorológicos, uma vez que os resultados da correlação de Pearson entre as variáveis apresentaram uma relação entre moderada e fortemente positiva. A análise de seca climatológica na região de estudo permitiu identificar que eventos externos e aspectos regionais, como a passagem de massas de ar e atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul auxiliaram no agravamento de eventos de seca na região de estudo no período de 2013 a 2018. Os anos em que os valores de ICV se tornaram menores, representados pela seca extrema e seca severa, estão diretamente relacionados com os eventos de escassez hídrica, oficialmente declarada, ocorrida entre os anos de 2014 a 2016 na sub-bacia.

O ICV e o IGS apresentaram a capacidade de caracterizar as mudanças sazonais da seca em uma região de estudo por meio da análise espectral da vegetação. Quando realizada a análise de regressão entre esses índices, identificou-se que as variáveis apresentam características semelhantes, indicando uma relação moderadamente positiva nos resultados da análise de regressão aplicada. Nesse aspecto, foi possível verificar que, se o valor do pixel de ICV diminui na região de estudo, o valor correspondente do IGS também tende a apresentar o mesmo comportamento.

Na comparação com dados de umidade do solo ao longo da série temporal analisada, verificou-se que o ICV possui maior capacidade de identificar as mudanças de reservas hídricas do solo que os dados de IGS. As diferenças apresentadas entre os resultados de regressão podem estar associadas a questões de incertezas estatísticas apresentadas por dados de sensoriamento remoto, principalmente, pelo fato dos resultados de IGS diferirem dos encontrados na literatura. Visto que as imagens utilizadas são de média resolução espacial, sugerem-se estudos adicionais com o uso de imagens de alta resolução, bem como análises de fatores locais que podem ter causado diferenças dos resultados encontrados e da literatura. Por fim, para maior fidelidade e eficiência do processo, sugere-se, também, a análise local por meio de visitas de campo para melhor identificação e precisão no mapeamento local da seca na região.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M. C. *et al.* Comparison of satellite-derived LAI and precipitation anomalies over Brazil with a thermal infrared-based Evaporative Stress Index for 2003-2013. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 287–302, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.005>
- ANDERSON, M. C. *et al.* The evaporative stress index as an indicator of agricultural drought in Brazil: an assessment based on crop yield impacts. **Remote Sensing of Environment**, v. 174, p. 82–99, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.034>
- ANTUNES, D. A.; CUPOLILLO, F. Análise do balanço hídrico climatológico decenal do Parque Estadual do Rio Doce - PERD e entorno: climatologia de 2005 - 2015 comparada com o ano anômalo 2013-2014. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, n. Edição Especial Dossiê Climatologia de Minas Gerais –, p. 342–356, 2018. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.59778>
- BANIYA, B. *et al.* Spatial and temporal variation of drought based on satellite derived vegetation condition index in Nepal from 1982–2015. **Sensors (Switzerland)**, v. 19, n. 2, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19020430>

- BEECHAM, S.; RAZZAGHMANESH, M. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate. **Water Research**, v. 70, p. 370–384, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.015>
- BHUIYAN, C.; KOGAN, F. N. Monsoon variation and vegetative drought patterns in the Luni Basin in the rain-shadow zone. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 12, p. 3223–3242, 2010. <https://doi.org/10.1080/01431160903159332>
- BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Avaliação 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**, v. 64, n. 4, p. 695–705, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000400020>
- BONIFACIO, R.; DUGDALE, G.; MILFORD, J. R. Sahelian rangeland production in relation to rainfall estimates from Meteosat. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 14, p. 2695–2711, 1993. <https://doi.org/10.1080/01431169308904302>
- BOONGALING, C. G. K.; ESLAVA, D. V. F.; LANSIGAN, F. P. Modeling land use change impacts on hydrology and the use of landscape metrics as tools for watershed management: The case of an ungauged catchment in the Philippines. **Land Use Policy**, v. 72, n. August 2016, p. 116–128, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.12.042>
- BRIASSOULIS, H. **The Web Book of Regional Science Sponsored by Analysis of Land Use Change : Theoretical and Modeling Approaches** By Helen Briassoulis. Randall Jackson: West Virginia University, 2019.
- CHANDRASEKAR, K. *et al.* Monitoring of agricultural drought using satellite based drought severity index over andhra pradesh state of India. **International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS**, v. 6, n. 1, p. 2343–2359, 2017. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.299>
- COVELE, P. A. Aplicação de índices das condições de vegetação no monitoramento em tempo quase real da seca em Moçambique usando NOAA-AVHRR. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, n. 29, p. 85–95, 2011.
- CUNHA, A. P. M. A. *et al.* Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, 2019. <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>
- CUNHA, A. P. M. DO A. *et al.* Avaliação de indicador para o monitoramento dos impactos da seca em áreas de pastagens no Semiárido do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 1, p. 89–106, 2017. <https://doi.org/10.14393/rbcv69n1-44034>
- DAVIES, N.; CHATFIELD, C. **The analysis of time series: an introduction**. 6. ed. New York Washington: CHAPMAN & HALL/CRC, 1990. v. 74.
- DECHANT, C. M.; MORADKHANI, H. Analyzing the sensitivity of drought recovery forecasts to land surface initial conditions. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 89–100, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.021>
- DECHANT, C. M.; MORADKHANI, H. Toward a reliable prediction of seasonal forecast uncertainty: Addressing model and initial condition uncertainty with ensemble data assimilation and Sequential Bayesian Combination. **Journal of Hydrology**, v. 519, n. PD, p. 2967–2977, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.045>
- DNAEE. **Bacia representativa de Juatuba; série E-02 (dados atualizados até 1975)**. 1. ed. Brasília: Departamento de águas e energia elétrica, 1981.
- DUBREUIL, V. *et al.* Os tipos de climas anuais no Brasil: Uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, v. 37, 2018. <https://doi.org/10.4000/confins.15738>
- DUFT, D. G.; PICOLI, M. C. A. Uso de imagens do sensor MODIS para identificação da seca na cana-de-açúcar através de índices espectrais. **Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, p. 52, 2018. <https://doi.org/10.5380/rsa.v19i1.54005>
- DUTRA, D. J. *et al.* Temporal analysis of drought coverage in a watershed area using remote sensing spectral indexes. **Sociedade & Natureza**, v. 33, p. 1–15, 2021. <https://doi.org/10.14393/SN-v33-2021-59505>
- DUTRA, D. J. **Uso do sensoriamento remoto para análise de eventos de seca em bacias hidrográficas: estudo de caso na sub-bacia do ribeirão Serra Azul. MG**. Dissertação ed. Belo

Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (Dissertação). Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

DUTRA, D. J.; BRIANEZI, D.; COELHO, C. W. G. A. Uso de Geotecnologias para Análise da Dinâmica da Vegetação da Sub-bacia do Ribeirão Serra Azul, MG. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 43, n. 4, p. 283–292, 18 dez. 2020. https://doi.org/10.11137/2020_4_283_292

DUTRA, D. J.; ELMIRO, M. A. T.; GARCIA, R. A. Comparative analysis of methods applied in vegetation cover delimitation using Landsat 8 images. **Sociedade & Natureza**, v. 32, n. July, p. 699–710, 9 out. 2020. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-56139>

EYOH, A.; OKEKE, F.; EKPA, A. Assessment of the effectiveness of the Vegetation Condition Index (VCI) as an indicator for monitoring drought condition across the Niger Delta region of Nigeria using AVHRR / MODIS NDVI. **European Journal of Earth and Environment**, v. 6, n. 1, p. 12–18, 2019.

FERNANDES, D. S. *et al.* **Índices para a Quantificação da Seca**. 1. ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. Índices espectrais de vegetação x agricultura. **Sensoriamento remoto em agricultura**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. p. 95–113.

GEBEYEHU, A. E. *et al.* Drought event analysis and projection of future precipitation scenario in Abaya Chamo sub-basin, Ethiopia. **Journal of Engineering and Technological Sciences**, v. 51, n. 5, p. 707–728, 2019. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.5.8>

GOMES, A. C. C.; BERNARDO, N.; ALCÂNTARA, E. Accessing the southeastern Brazil 2014 drought severity on the vegetation health by satellite image. **Natural Hazards**, v. 89, n. 3, p. 1401–1420, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3029-6>

GOMES, A. R. DOS S. *et al.* Estudo da Relação entre a Variabilidade dos índices de Vegetação e Temperatura da Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 3, p. 359–368, 2019. <https://doi.org/10.1590/0102-7786343051>

HONDA, E. A.; DURIGAN, G. A restauração de ecossistemas e a produção de água. **Hoehnea**, v. 44, n. 3, p. 315–327, 2017. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-82/2016>

IBGE. **Dados vetoriais**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/informacoes-ambientais/climatologia/15817-clima.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 22 jul. 2020.

INFOCLIMA. **Boletins mensais**. Disponível em: <<http://infoclima.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 11 ago. 2020.

INMET. **Boletim Agroclimático**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/?r=agrometeorologia/boletinsAgroclimatologicos>>. Acesso em: 11 ago. 2020.

JARDIM, C. H.; MOURA, F. P. Variação dos totais de chuvas e temperatura do ar na bacia do rio Pandeiros, norte do estado de Minas Gerais - Brasil: articulação com fatores de diferentes níveis escalares em área de transição climática de cerrado para semiárido. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 149–164, 2018. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.61013>

JIAO, W. *et al.* Evaluating an enhanced vegetation condition index (VCI) based on VIUPD for drought monitoring in the continental United States. **Remote Sensing**, v. 8, n. 3, 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8030224>

KAMBLE, D. B. *et al.* Drought assessment for kharif rice using standardized precipitation index (SPI) and vegetation condition index (VCI). **Journal of Agrometeorology**, v. 21, n. 2, p. 182–187, 2019. <https://doi.org/10.54386/jam.v21i2.230>

KOGAN, F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. **Advances in Space Research**, v. 15, n. 11, p. 91–100, 1995a. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)

KOGAN, F. N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. **Bulletin - American Meteorological Society**, v. 76, n. 5, p. 655–668, 1995b. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2)

- LEIVAS, J. F. *et al.* Monitoramento da seca 2011/2012 no nordeste brasileiro a partir do satélite Spot-vegetation e TRMM. **Revista Engenharia Na Agricultura - Reveng**, v. 22, n. 3, p. 211–221, 2014. <https://doi.org/10.13083/1414-3984.v22n03a03>
- LIANG, L. *et al.* Long-term spatial and temporal variations of vegetative drought based on vegetation condition index in China. **Ecosphere**, v. 8, n. 8, 2017. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1919>
- LIMA, J. M.; CUPOLILLO, F. Análise espaço-temporal das chuvas persistentes na região do Parque Estadual do Rio Doce - PERD, sob influências das ZCAS e ZCOU (out/2015 a dez/2016). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, n. Edição Especial Dossiê Climatologia de Minas Gerais –, p. 149–164, 2018. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.59298>
- LIMA, W. DE P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.
- LOPES, H. L. *et al.* Espacialização da umidade do solo por meio da temperatura da superfície e índice de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 9, p. 973–980, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000900014>
- MACKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. **Eingth Conference on Applied Climatology**, p. 17–22, 1993.
- MELLO, K. DE; TOPPA, R. H.; LEITE, E. C. Priority areas for forest conservation in an urban landscape at the transition between Atlantic Forest and Cerrado. **Cerne**, v. 22, n. 3, p. 277–288, 2016. <https://doi.org/10.1590/01047760201622032172>
- MINAS-GERAIS. **Portaria IGAM nº 014, de 08 de abril de 2015**. Declara situação crítica de escassez hídrica superficial na porção hidrográfica localizada no reservatório Serra Azul e a sua bacia de contribuição.: Belo Horizonte. , 2015
- MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1–2, p. 202–216, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- MU, Q. *et al.* A remotely sensed global terrestrial drought severity index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 94, n. 1, p. 83–98, 2013. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00213.1>
- MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781–1800, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>
- MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. **MODIS global terrestrial evapotranspiration (ET) product (NASA MOD16A2/A3) collection 5. 1**. ed. Missoula: NASA Headquarters, 2013.
- NEVES, B. V. B. Geoprocessamento como ferramenta no estudo de correlação entre a dinâmica da cobertura vegetal e evapotranspiração na bacia do Ribeirão Serra Azul - MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1857, n. 31, p. 211, 2005.
- NEVES, B. V. B.; VERSIANI, B. R.; RODRIGUES, P. C. H. Geoprocessamento como Ferramenta no Estudo de Correlação entre a Dinâmica da Cobertura Vegetal e a Evapotranspiração. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 4, p. 87–102, 2007. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v12n4.p87-102>
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1979.
- PALLOTTA, M.; NAKAZATO, R. Y. Caracterização de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) em janeiro e fevereiro de 2010. **PhD Proposal**, v. 1, 2015.
- PANU, U. S.; SHARMA, T. C. Challenges in drought research: some perspectives and future directions. **Hydrological Sciences Journal**, v. 47, n. October 2014, p. S19–S30, 2014. <https://doi.org/10.1080/02626660209493019>
- PARANHOS, R. *et al.* Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson: o Retorno. **Leviathan (São Paulo)**, n. 8, p. 66, 2014. <https://doi.org/10.11606/issn.2237-4485.lev.2014.132346>
- PEARSON, K. The grammar of science. **Nature**, v. 46, n. 1185, p. 247–247, 1982. <https://doi.org/10.1038/046247b0>

- PEARSON, K.; FISCHER, R.; INMAN, H. F. Karl Pearson and R. A. Fischer on Statistical Test: A 1935 exchange from nature. **The American Statistician**, v. 48, n. 1, p. 2–11, 1994. <https://doi.org/10.1080/00031305.1994.10476010>
- PHILLIPS, O. L. *et al.* Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. **Science**, v. 323, n. 3–4, p. 1344–1347, 2009.
- RAO, M. *et al.* Mapping drought-impacted vegetation stress in California using remote sensing. **GIScience and Remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 185–201, 2017. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1287397>
- ROSSATO, L. *et al.* Impact of soil moisture over Palmer Drought Severity Index and its future projections in Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos Brazilian**, v. 22, n. 36, 2017. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0117160045>
- SACRAMENTO- NETO, O. B. DO; ESCOBAR, G. C. J.; SILVA, P. E. D. DA. Método objetivo para identificar episódios de Zonas de Convergência de Umidade (ZCOU) no ambiente operacional do Centro de Previsão de Tempo e Estados Climáticos - CPTEC. **IX Congresso Brasileiro De Meteorologia**, n. 26, p. 1–5, 2010.
- SANQUETTA, C. R. *et al.* Dinâmica em superfície, volume, biomassa e carbono nas florestas nativas brasileiras: 1990-2015. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3, n. 1, p. 193, 2018. <https://doi.org/10.5380/biofix.v3i1.58513>
- SANTOS, M. J. J. **Caracterização e Monitoramento de Secas**. 1. ed. Brasília: Instituto da Água - Direção de Serviços de Recursos Hídricos (INAG-DSRH), 1998.
- SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. **Sensoriamento remoto para desastres**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- SHEN, Z. *et al.* Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: A case study in a typical urbanised watershed in China. **Ecological Indicators**, v. 48, p. 417–427, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.019>
- SOUSA-JÚNIOR, M. DE A.; SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. **Monitoramento de estiagem na região sul do Brasil utilizando dados ENVI/MODIS no período de dezembro de 2000 a junho de 2009**. 2011, Curitiba: INPE, 2011. p. 7934–7941.
- SUN, G.; LOCKABY, B. G. Urban-rural interfaces: linking people and nature. **Sun and Lockaby**, v. 27606, p. 29–48, 2012. <https://doi.org/10.2136/2012.urban-rural.c3>
- TANNEHILL, I. R. **Drought: Its Causes and Effects**. New Jersey: Princeton University Press, 1947. <https://doi.org/10.1097/00010694-194707000-00010>
- UTTARUK, Y.; LAOSUWAN, T. Drought detection by application of remote sensing technology and vegetation phenology. **Journal of Ecological Engineering**, v. 18, n. 6, p. 115–121, 2017. <https://doi.org/10.12911/22998993/76326>
- VAN LANEN, H. A. J. *et al.* Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 17, p. 3097–3104, 2016. <https://doi.org/10.1002/hyp.10838>
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Editora McGraw Hill do Brasil, 1975.
- WEST, H.; QUINN, N.; HORSWELL, M. Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: progress, past challenges and future opportunities. **Remote Sensing of Environment**, v. 232, n. November 2018, p. 111291, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111291>
- WILHITE, D. A. Drought. **Encyclopedia of Earth System Science**, v. 2, p. 81–92, 1992.
- WILHITE, D. A.; SVOBODA, M. D. **Drought early warning systems in the context of drought preparedness and mitigation**. 1. ed. Nebraska: National Drought Mitigation Center, 2000.
- WMO. **Drought monitoring and early warning : concepts , progress and future challenges**. 1. ed. Washington: WMO, 2006.
- WU, Z. *et al.* MODIS derived vegetation index for drought detection on the San Carlos Apache Reservation. **International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS**, v. 5, n. 1, p. 1524–1538, 2016. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.44>

YULISTYA, V. D.; WIBOWO, A.; KUSRATMOKO, E. Assessment of agricultural drought in paddy field area using Vegetation Condition Index (VCI) in Sukaresmi District, Cianjur Regency. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 311, n. 1, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/311/1/012020>

ZAMBRANO, F. *et al.* Sixteen years of agricultural drought assessment of the biobío region in Chile using a 250 m resolution vegetation condition index (VCI). **Remote Sensing**, v. 8, n. 6, p. 1–20, 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8060530>

ZHAN, Z.; QIN, Q.; WANG, X. The application of LST/NDVI index for monitoring land surface moisture in semiarid area. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v. 3, n. C, p. 1551–1554, 2004.

ZHANG, J.; MU, Q.; HUANG, J. Assessing the remotely sensed Drought Severity Index for agricultural drought monitoring and impact analysis in North China. **Ecological Indicators**, v. 63, p. 296–309, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.062>

Recebido em: 06/10/2021

Aceito para publicação em: 04/01/2022