

Análise Espacial do Nível de Água em Poços de Monitoramento e sua Relação com o Uso e Ocupação do Solo na Região do Aquífero Urucuia

Spatial Analysis of Water Level in Monitoring Wells and its Relationship with Land Use and Occupation in the Urucuia Aquifer Region

Stephane Narde Lopes Vasconcelos ¹, Fabiano Peixoto Freiman ²

¹ UFBA, Salvador, Brasil. stephane.narde@ufba.br.

² UFBA, Salvador, Brasil. fabiano.freiman@ufba.br.

Resumo: Há uma preocupação crescente com a gestão dos recursos hídricos, devido ao seu uso para diversos fins, dentre eles, a irrigação nas regiões agropecuárias, como o oeste da Bahia e seu entorno, que utilizam a água advinda do Aquífero Urucuia. Partindo destes pressupostos, deseja-se entender se há uma correlação entre a variação dos níveis de água subterrânea monitorada por poços e a dinâmica do uso e ocupação do solo na região do aquífero Urucuia entre os anos de 2015 e 2022. Para tanto, aplicou-se processos de análise espacial para avaliar a correlação entre a variação do nível de água mensurada em poços de monitoramento que compõem a Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas - RIMAS, o tipo de uso e ocupação do solo disponível na série temporal do MapBiomas para a região em questão e, por fim, complementando a análise com dados de precipitação. De maneira geral, a metodologia adotada não permitiu concluir que a área ocupada por agropecuária tem um efeito direto no armazenamento de água subterrânea na região estudada. Em contrapartida, a análise de correlação espacial entre a área dedicada à agropecuária e índices de precipitação revelou uma relação entre ambas. Isso sugere que o impacto da agropecuária na região está mais associado ao desmatamento da vegetação nativa para sua implementação do que ao uso da água para irrigação.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Análise espacial. Poços de monitoramento. Uso e ocupação do solo. Irrigação.

Abstract: There is a growing concern about the management of water resources due to their use for various purposes, including irrigation in agricultural regions such as western Bahia and its surroundings, which use water from the Urucuia Aquifer. Based on these assumptions, the aim is to understand whether there is a correlation between the variation in groundwater levels monitored by wells and the dynamics of land use and occupation in the Urucuia aquifer region between the years 2012 and 2022. To achieve this goal, spatial analysis processes are used to evaluate the correlation between the variation in water level measured in monitoring wells that make up the Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas - RIMAS (Integrated Groundwater Monitoring Network), and the type of land use and occupation available in the MapBiomas time series for the region in question. In general, the methodology adopted did not allow to conclude that the area occupied by agriculture has a direct effect on groundwater storage in the region studied. On the other hand, the spatial correlation analysis between the area dedicated to farming and precipitation indices revealed a relationship between them. This suggests that the impact of farming in the region is more associated with the deforestation of native vegetation for its implementation than with the use of water for irrigation.

Keywords: Water resources. Spatial analysis. Monitoring wells. Land use and occupation. Irrigation.

1 INTRODUÇÃO

A crise hídrica é uma preocupação atual. Dos anos de 2012 até 2020 este assunto apareceu entre os cinco maiores riscos listados pelo Fórum Econômico Mundial (FORUM, 2021). Já na septuagésima sétima sessão da Assembleia Geral das Nações Unidas, em 2022, houve a emissão de alerta vermelho para o problema do clima e abastecimento de água (LEDERER, 2022). A preocupação está relacionada com a capacidade dos recursos naturais atenderem as demandas que lhe serão solicitadas, um aspecto que está relacionado à manutenção da vida de espécies animais e vegetais.

Logo, a preservação de fontes superficiais e subterrâneas de água é um assunto de frequente discussão, pois são consideradas como um recurso natural parcialmente renovável (NETO, 2006). Destas fontes de obtenção de água, a exploração subterrânea é uma ameaça para a sustentabilidade dos ecossistemas, fornecimento de água e desenvolvimento social e econômico (MOHANTY et al., 2010). Segundo Ouma et al. (2015) e Xiao et al. (2015), no mundo, metade da demanda doméstica é atendida por águas subterrâneas, além de ser a principal fonte para indústria, agricultura e irrigação. Entender o comportamento hidrológico e realizar previsões quanto a sua variação ao longo do tempo é uma tarefa complexa e essencial para monitorar a disponibilidade de água superficial e subterrânea armazenada (BONSOR et al., 2018; DAPENG et al., 2014; GREEN et al., 2011).

Tratando-se do uso da água para a irrigação em 2019, no Brasil, atingiu-se a marca de 8,2 milhões de hectares de área irrigada, um aumento de 34% com relação à 2014, com 6,1 milhões hectares (ANA, 2021). Algumas localidades do país se destacam pela produção agrícola, dentre elas, o Oeste do estado da Bahia, que a partir da década de 1970, teve o crescimento e desenvolvimento da agricultura na região (BUAINAIN; GARCIA, 2016). Segundo Ferreira et al. (2021), entre os anos de 1985 e 2015, o Oeste baiano teve aproximadamente 21.782 km² de vegetação natural degradados para o cultivo de *commodities* agrícolas. Estes, por sua vez, tiveram um aumento de 385% de crescimento de área ocupada. Já a quantidade de pivôs centrais para irrigação na região teve um aumento de 1365% em 30 anos, saindo de nove unidades, em 1985, para mil duzentos e trinta e oito no ano de 2015, explorando o aquífero Urucuia, região de estudo deste trabalho (FERREIRA et al., 2021).

A exploração de águas subterrâneas é apontada como uma causa provável para a variação da capacidade de armazenamento de um aquífero, e estudar esta dinâmica não é uma tarefa trivial. Comumente, aplica-se metodologias para avaliação da qualidade da água (CARVALHO et al., 2020; PEIXOTO; CAVALCANTE, 2019; SANTOS, 2013) e não quantidade. Para este último, algumas técnicas são empregadas, como a utilização dos satélites *Gravity Recovery and Climate Experiment – GRACE* (CHANU et al., 2020; OUMA et al., 2015) ou poços de monitoramento de nível de água (KUHN et al., 2022; LUIZ et al., 2017; NETO, 2006). O monitoramento de poços é uma ferramenta importante para diagnosticar e controlar as condições dos aquíferos, fornecendo informações para compreender o estado atual e as tendências dos parâmetros monitorados, além de documentar as respostas às atividades antrópicas e aos fatores naturais. Isto fornece informações necessárias para auxiliar no suporte ao processo de tomadas de decisão para planejar, controlar, restaurar e proteger aquíferos, além de meios para avaliar os resultados das ações dos órgãos relacionados a estas medidas (NETO, 2006). O estudo de níveis em poços pode ser associado a técnicas de análise espacial, para correlacionar uma ou mais variáveis geográficas que possam influenciar na gestão racional da água subterrânea, como, por exemplo, o uso e a ocupação do solo.

Partindo destes pressupostos, deseja-se entender se há uma correlação entre a variação dos níveis de água subterrânea monitorada por poços e a dinâmica do uso e ocupação do solo na região do aquífero Urucuia entre os anos de 2015 e 2022. Para tanto, aplicou-se processos de análise espacial para avaliar a correlação entre a variação do nível de água mensurada em poços de monitoramento que compõem a Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas - RIMAS, e o tipo de uso e ocupação do solo disponível na série temporal do MapBiomias para a região de estudo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção destina-se à descrição dos materiais e métodos aplicados para a realização e alcance dos objetivos deste estudo. Primeiramente, na Subseção 2.1 são descritos os materiais. Posteriormente, apresenta-se o fluxo metodológico proposto (Subseção 2.2).

2.1 Materiais

No Quadro 1 são descritos os softwares usados para analisar os dados geoespaciais da região de estudo, Aquífero Urucuia (Figura 1a), compreendendo seis estados do Brasil, sendo eles Bahia, Piauí, Maranhão, Tocantins, Goiás e Minas Gerais, com aproximadamente 127 mil km².

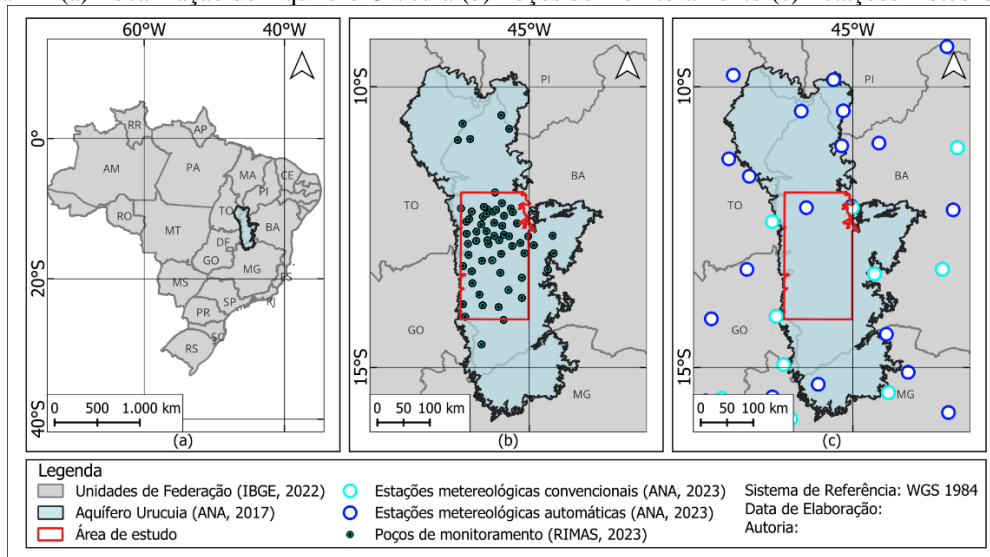
Quadro 1 – Principais softwares utilizados.

Software	Descrição
QGIS Desktop 3.28.9	Software de sistema de informação geográfica (SIG) utilizado para a execução de análises espaciais.
GeoDa 1.22	Software de código aberto projetado para a realização de análises espaciais, com foco na estatística espacial.

Elaboração: Os autores (2024).

O polígono de referência do aquífero Urucuia foi obtido através do portal da Agência Nacional de Águas (ANA) (2017), que promove o uso sustentável e integrado dos recursos hídricos no Brasil, visando à segurança hídrica e ao desenvolvimento sustentável. Os dados para compor o estudo foram obtidos de forma gratuita em plataformas digitais. A análise do nível da água em poços de monitoramento, baseou-se na Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas - RIMAS, operada pelo Serviço Geológico Brasileiro (CPRM) (2023). Foram selecionados os poços de monitoramento de modo que sua posição geográfica permitisse estimar valores de nível de água a partir de processos de interpolação, inclusive ultrapassando os limites da área de estudo para minimizar possíveis erros de estimativa pelos algoritmos interpoladores. Devido a esta necessidade, conforme Figura 1b, definiu-se inicialmente uma área de busca limitada por um retângulo envolvente com coordenadas geográficas de 10°09'20"S 46°40'00"O e 16°03'50"S 43°39'50"O. Porém, após realização da busca dos poços na região, foi observado que havia uma concentração de dados na área central do aquífero. Os pontos localizados ao norte e sul passaram por variações em sua existência, mas a abundância de poços na região central se manteve similar no intervalo temporal analisado. Por isso, foi tomada a decisão de reduzir a área de estudo, para cobrir apenas a região central do aquífero Urucuia, como destacado em vermelho na área de estudo da Figura 1(b), por possuir maior amostragem de dados de poços de monitoramento.

Figura 1 – (a) Localização do Aquífero Urucuia (b) Poços de monitoramento (c) Estações meteorológicas



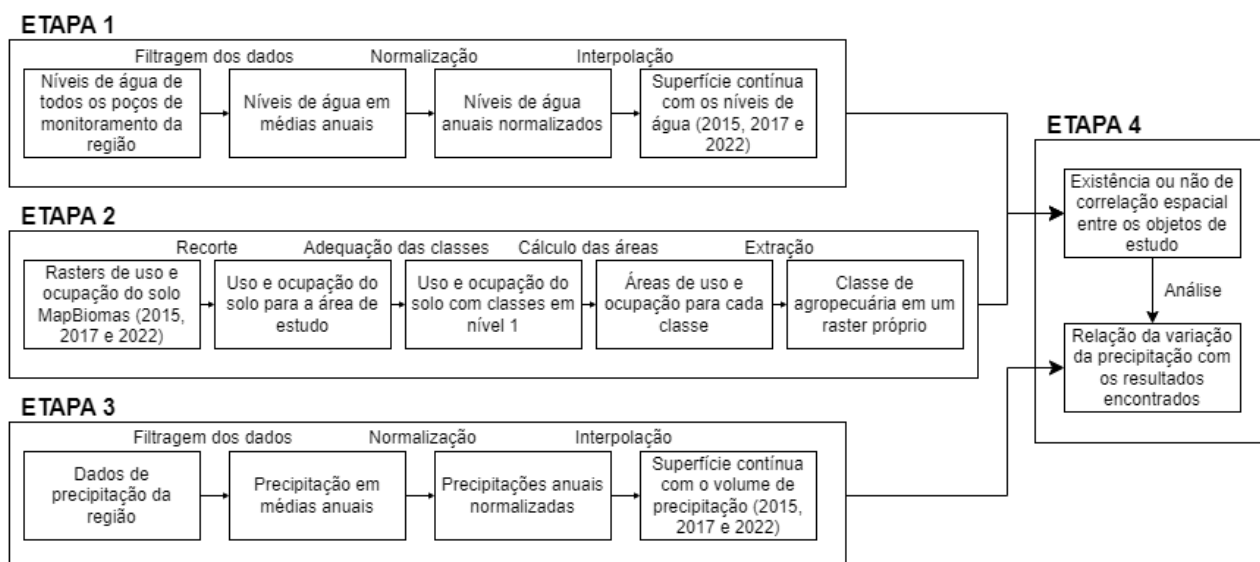
Fonte: os autores (2024).

A análise do nível de água dos poços foi complementada com dados de precipitação mensais das estações meteorológicas automáticas e convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (2023), órgão vinculado ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento que tem como principal missão monitorar e fornecer informações meteorológicas para todo o território nacional. Ao total, foram utilizadas 17 estações meteorológicas convencionais e 39 automáticas para realização do processamento. Dentre os dados fornecidos estão temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, porém, apenas a precipitação foi utilizada (Figura 1c). Dados de uso e ocupação do solo, obtidos a partir da página do Projeto Mapbiomas (2023), também foram aplicados. Estes produtos são disponibilizados gratuitamente em formato matricial, com resolução espacial de 30x30m, partindo do ano de 1985, construídos com base na classificação pixel a pixel de imagens de satélites Landsat. Foram usados os dados referentes aos anos de estudo, 2015, 2017 e 2022.

2.2 Método

O método aplicado neste trabalho consiste em quatro etapas, conforme ilustra o fluxograma da Figura 2 e descritas nas subseções que seguem.

Figura 2 – Fluxograma das atividades desenvolvidas.



Fonte: os autores (2024).

2.2.1 ETAPA 1 - PROCESSAMENTO DOS DADOS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO

Após seleção dos poços de monitoramento localizados na região de estudo, foram realizadas análises no conjunto de dados com o objetivo de entender a variação do nível de água entre os anos analisados a partir da construção de uma superfície contínua, para isso, três etapas foram aplicadas: filtragem, normalização e interpolação.

A etapa de filtragem consistiu em realizar o agrupamento dos dados de nível de água para obtenção de uma série temporal baseada nas médias anuais de cada poço de monitoramento. Por se tratar de uma quantidade volumosa de dados, foi necessário usar o Power Query, ferramenta de transformação e preparação de dados dentro do Excel, que permite a manipulação de base de dados extensas com eficiência.

Em seguida, foi necessário normalizar os dados, transformando-os em uma escala até 100, na qual 100 representa a máxima média anual para este mesmo poço e os demais valores são calculados proporcionalmente, conforme Eq. (1):

$$x_{normalizado} = \frac{x - x_{mín}}{x_{máx} - x_{mín}} \quad (1)$$

O processo de normalização teve como objetivo transformar as observações de nível de água subterrânea, para cada ano analisado, em uma mesma ordem de grandeza. Este processo se baseou na definição de uma escala de variação para todos os anos analisados, tomando como parâmetro as médias anuais mínimas e máximas, respectivamente 0 e 100. Desta forma, é possível garantir que os locais com menores ou maiores medidas foram analisados em uma escala de variação consistente. O objetivo, neste caso, não é realizar a análise com os valores medidos de nível de água subterrânea, mas com variações em uma escala pré-definida considerando um mesmo ano.

Por fim, a terceira etapa de interpolação foi aplicada. Entretanto, antes de definir o método interpolador para as amostras, efetuou-se um processo de validação cruzada para identificar o método adequado a distribuição amostral disponível. Foram testados os interpoladores Inverso da Distância Ponderada (IDW), Krigagem Ordinária e a utilização de técnicas de Machine Learning, com a implementação do *Support Vector Machine* (SVM). A primeira opção está disponível no QGis através da ferramenta Interpolação IDW, enquanto as duas últimas estão presentes do plugin *Smart-Map*, desenvolvido em Python 3.7 e é compatível com as versões 3.10 ou superiores do QGis (PEREIRA et al., 2022).

O processo de validação cruzada consistiu na seleção de cinco pontos do conjunto amostral que não foram utilizados nos processos de interpolação. A intenção foi amostrar os valores dos pixels nesses pontos e avaliar qual interpolador permite encontrar valores próximos daqueles medidos *in loco*. Os resultados são apresentados na Subseção 3.1.

Obteve-se como melhor resultado a técnica de interpolação desenvolvida por Pereira et al. (2022) a partir do plugin *Smart-Map*, um método baseado em Machine Learning e no modelo SVM. Neste plugin, os parâmetros do SVM (hiperparâmetros) como C e γ são otimizados a partir de um método sistemático de busca em grade, permitindo assim um ajuste automatizado sem a interferência do usuário, já que é realizada uma validação cruzada do tipo *k-fold* para se obter os valores ótimos destes hiperparâmetros. Para realizar a interpolação, o usuário adiciona covariáveis ao modelo SVM e define o número de vizinhos a serem considerados, bem como o raio de busca (PEREIRA et al., 2022). Neste caso, para todos os anos, foram usadas como covariáveis as coordenadas X e Y de cada ponto.

2.2.2 ETAPA 2 - PROCESSAMENTO DOS DADOS DE USO DO SOLO

Usando as ferramentas disponíveis no software QGis, foi possível extrair informações acerca do uso e ocupação do solo na região de estudo, tendo como base os dados fornecidos pelo MapBiomias. Como indicado no fluxograma da Figura 2, foi feito o recorte de cada raster para a área de estudo. Em sequência, aplicou-se um processo de reclassificação, de modo a obter as classes de uso do solo no nível 1 do MapBiomias, que consistem em: floresta, formação natural não florestal, agropecuária, área não vegetada e corpo d'água.

Posteriormente, foi feito um processo de extração das áreas classificadas como agropecuária, pois desta forma é possível obter informações relacionadas a expansão da agricultura e agropecuária praticada na área do aquífero Urucua.

2.2.3 ETAPA 3 - PROCESSAMENTO DOS DADOS DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

Para os dados de precipitação e geração de uma superfície contínua por meio da aplicação de interpoladores, também foram executadas etapas de filtragem, normalização e interpolação. Além disso, foi realizado um processo de validação cruzada, similar ao apresentado na Subseção 2.2.1, a partir da extração de quatro pontos do conjunto amostral. Ao final, com base nos resultados obtidos (Subseção 3.1), foi selecionada como técnica de interpolação para o conjunto amostral das estações meteorológicas a Krigagem Ordinária.

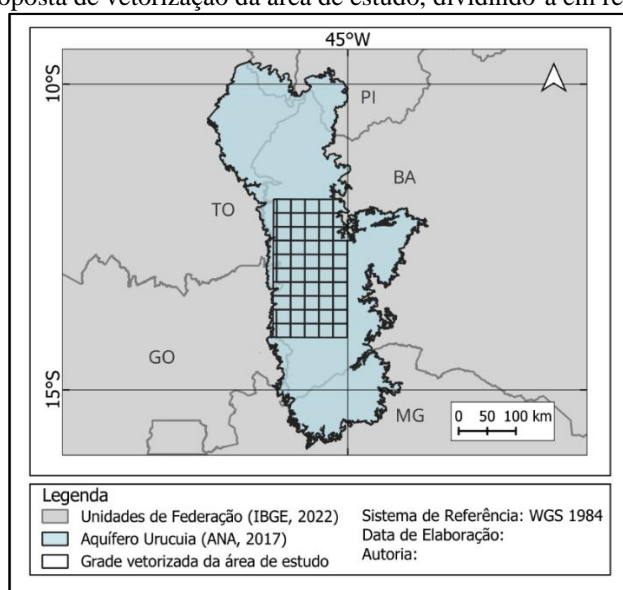
Este método foi pensado por Daniel G. Krige na década de 1950 e consiste na atribuição de pesos às diferentes amostras. Enquanto na interpolação linear simples os pesos são uniformemente distribuídos como $1/N$ (onde N é o número de amostras), e na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias os pesos são determinados pelo inverso do quadrado da distância entre o valor interpolado e os valores observados, a Krigagem adota uma abordagem distinta. Neste caso, há uma semelhança com a interpolação por média móvel ponderada, contudo, os pesos são derivados de uma análise espacial fundamentada no semivariograma experimental. Ademais, a Krigagem proporciona estimativas médias que são não tendenciosas

e caracterizadas por uma variância minimizada (DRUCK et al., 2004).

2.2.4 ETAPA 4 - ANÁLISE DA CORRELAÇÃO

Para encontrar a existência de correlação espacial entre a variação dos níveis normalizados de água nos poços de monitoramento com o uso e ocupação do solo, principalmente com relação à classe de agropecuária, foi feita, inicialmente, uma avaliação visual dos mapas obtidos. A posteriori, foi executada a vetorização dos rasters obtidos nos procedimentos explanados nas subseções 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3, com o objetivo de permitir a execução do próximo passo: aplicação do Índice de Moran bivariado (uma medida estatística utilizada para avaliar a correlação espacial em dados geográficos) no software GeoDa. Estas vetorizações envolveram a divisão em parcelas menores da região de estudo para que fosse possível analisar a correlação espacial ao longo do polígono envolvente da área de análise, como ilustra a Figura 3. O resultado desta vetorização é uma quadrícula para cada ano, na qual cada parte dela possui um valor amostrado de área de agropecuária, média dos valores dos pixels do nível normalizado de água subterrânea e média dos valores dos pixels de índice de precipitação.

Figura 3 - Proposta de vetorização da área de estudo, dividindo-a em regiões menores.



Fonte: os autores (2024).

A correlação espacial é a tendência de observações semelhantes estarem mais próximas umas das outras no espaço. O Índice de Moran ajuda a quantificar essa relação espacial, indicando se há uma distribuição espacialmente agrupada, dispersa ou aleatória dos valores em um conjunto de dados. O Índice de Moran varia de -1 a 1. Se o índice for próximo de 1, indica correlação espacial positiva, o que significa que valores semelhantes tendem a ocorrer próximos uns dos outros. Se o índice for próximo de -1, indica correlação espacial negativa, sugerindo que valores opostos tendem a ocorrer próximos uns dos outros. Já se o índice for próximo de 0, sugere uma distribuição espacial aleatória, indicando ausência de correlação espacial significativa (LUZARDO et al., 2017).

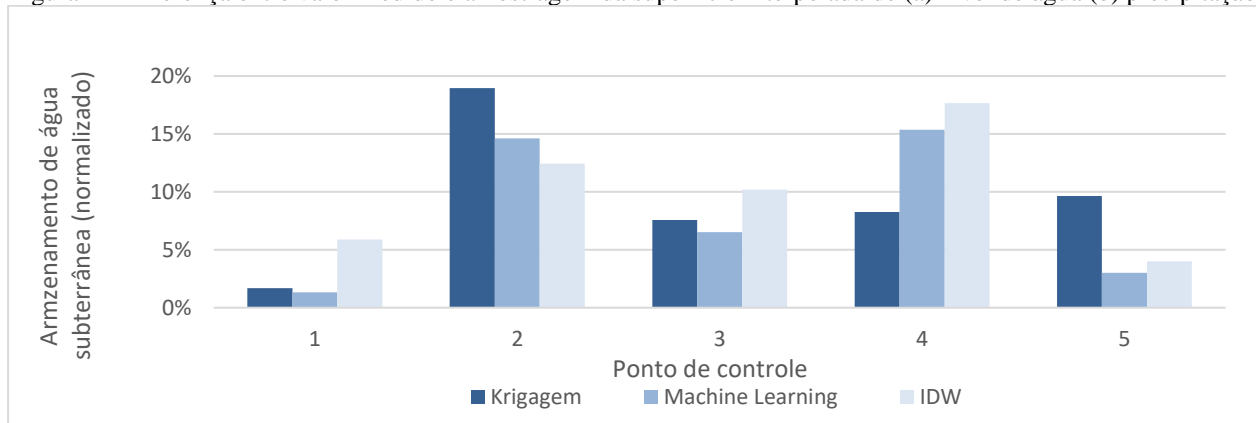
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção é destinada a apresentação dos resultados obtidos com o método proposto. Primeiramente, apresenta-se os resultados relacionados a Validação Cruzada para escolha do método de interpolação adequado ao conjunto amostral (Subseção 3.1). Adiante, na Subseção 3.2 são apresentados os resultados relacionados a evolução temporal do uso e ocupação do solo, precipitação e nível de água para a região de estudo. Por fim, a análise da correlação espacial baseada no Índice de Moran é discutida (Subseção 3.3).

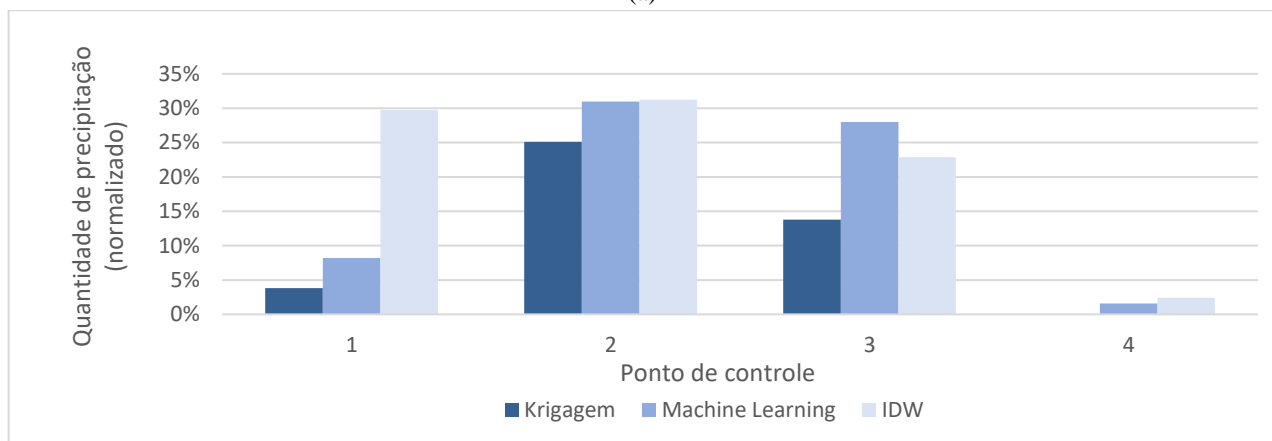
3.1 Validação cruzada

Conforme mencionado, a escolha do método ideal para a interpolação dos dados foi realizada a partir de um processo de validação cruzada. Para a amostra de poços de monitoramento, o resultado é apresentado na Figura 4a. Como pode ser observado, o uso de técnicas de Machine Learning apresentou valores mais próximos do real quando comparado com os demais métodos aplicados a amostra.

Figura 4 – Diferença entre valor medido e amostragem da superfície interpolada de (a) nível de água (b) precipitação.



(a)



(b)

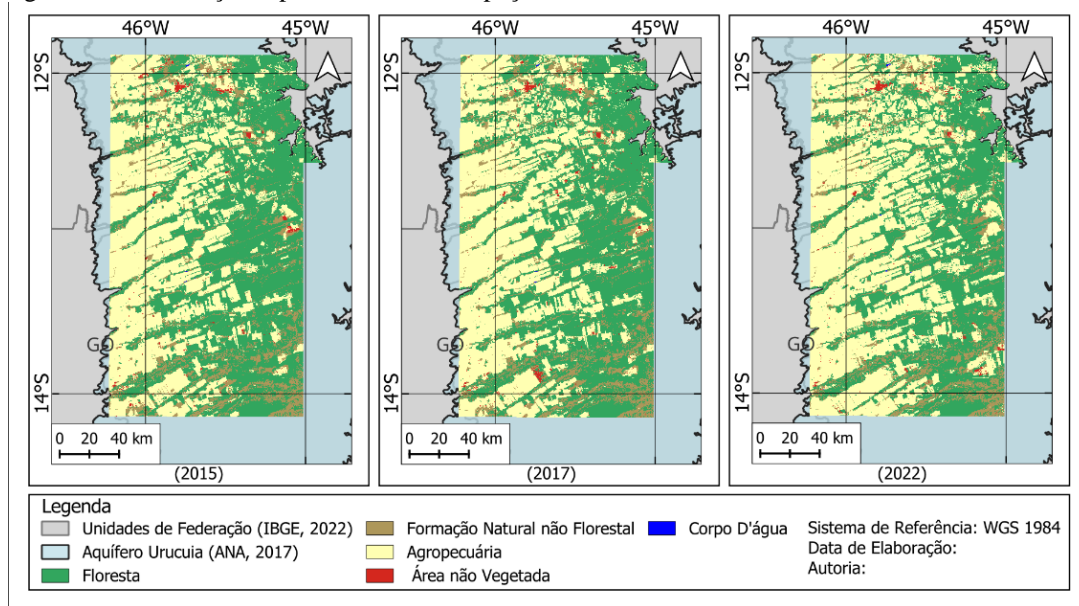
Fonte: os autores (2024).

Para as estações meteorológicas (Figura 4b), o uso da interpolação por Krigagem Ordinária apresentou valores mais próximos do real. Este método de interpolação também apresentou menores discrepâncias no somatório dos quadrados das diferenças. Este resultado mostra como diferentes interpoladores podem ter performances distintas de acordo com o conjunto amostral que está sendo trabalhado.

3.2 Evolução temporal

Na avaliação temporal do uso e ocupação do solo (Figura 5), observou-se uma crescente da classe de agropecuária, algo que era esperado, devido o conhecido avanço da produção agrícola na região.

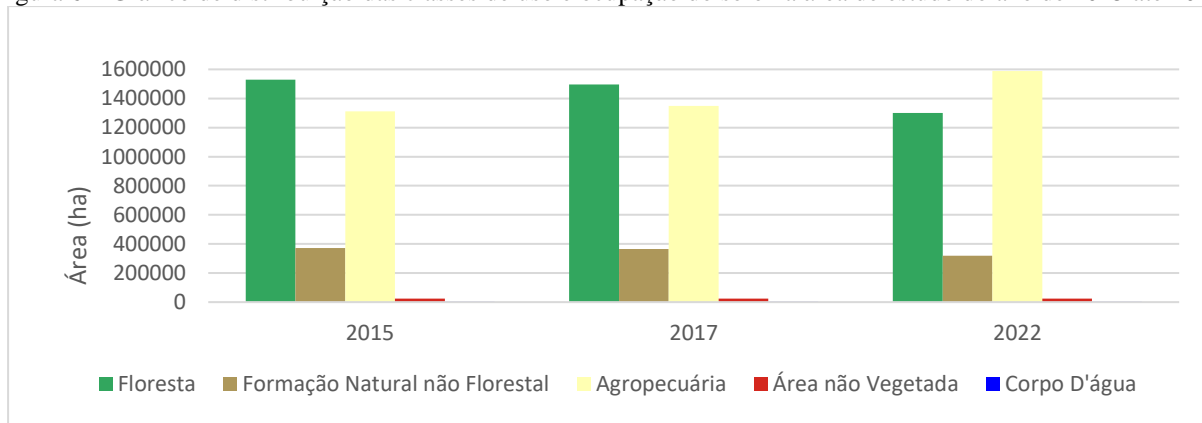
Figura 5 – Distribuição espacial do uso e ocupação do solo na área de estudo do ano de 2015 até 2022.



Fonte: os autores (2024).

Quantitativamente, teve-se um aumento de 2,8% das áreas classificadas como agropecuária entre os anos de 2015 e 2017 e 17,9% entre os anos de 2017 e 2022, totalizando 21,2% ao longo do período estudado. Essas informações são ilustradas na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico de distribuição das classes de uso e ocupação do solo na área de estudo do ano de 2015 até 2022.

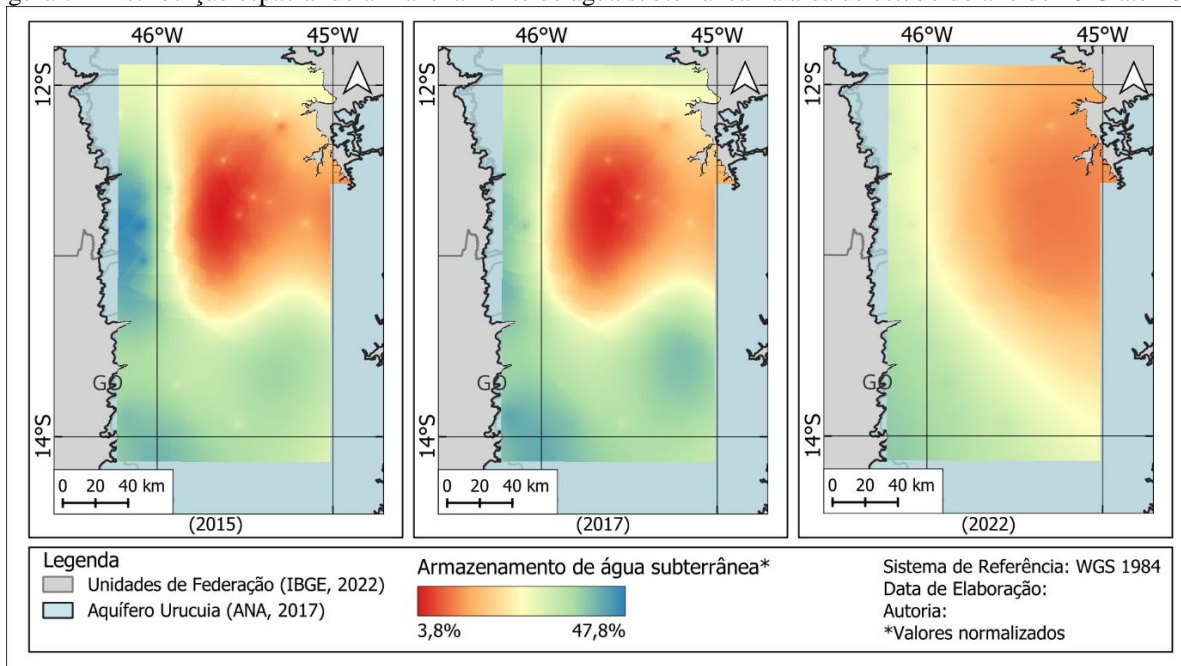


Fonte: os autores (2024).

Estes resultados são corroborados por estudos feitos por Boaventura et al. (2019), Esquerdo et al. (2015) e Santos et al. (2018), nos quais avaliam e constataam o aumento da área da agricultura na região do Matopiba e oeste da Bahia ao longo dos anos.

Com relação ao armazenamento de água subterrânea medido pelos poços de monitoramento, a evolução temporal espacial é apresentada nos mapas da Figura 7.

Figura 7 - Distribuição espacial do armazenamento de água subterrânea na área de estudo do ano de 2015 até 2022.



Fonte: os autores (2024).

Neste caso, a avaliação por meio de mapas não é tão intuitiva como no uso e ocupação do solo. Por isso, o Quadro 2 foi elaborado com o objetivo de apresentar a média dos valores normalizados para os três anos de estudo.

Quadro 2 – Média dos valores normalizados de armazenamento de água subterrânea de 2015 a 2022.

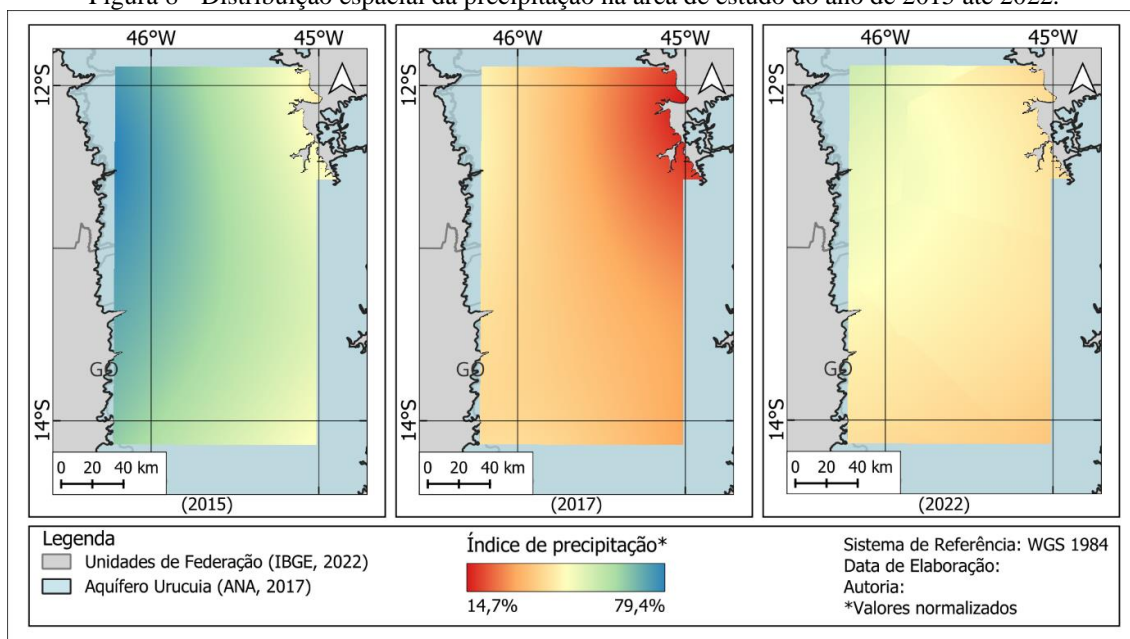
	2015	2017	2022
Média	26,88%	27,03%	23,11%

Fonte: os autores (2024).

Como é possível observar na Figura 7, entre os anos de 2015 e 2022 houve uma expansão da área com medições mais baixas de nível de água subterrânea nos poços de monitoramento. Essa afirmação é feita considerando que mesmo com uma tonalidade de vermelho mais clara no ano de 2022 com relação aos demais anos, a região com medições de nível de água mais próximos do máximo anual perdeu espaço. Esse resultado pode indicar uma disseminação dos poços com menores medições de nível de água subterrânea ao longo do tempo, que é refletido nos dados de média representados no Quadro 2, no qual o ano de 2022 apresenta a menor média geral com relação aos anos de 2015 e 2017.

A análise feita usando dados de uso e ocupação do solo e níveis de água subterrânea não é suficiente para determinar a correlação entre o aumento da área de agricultura e pecuária com a minimização dos níveis de água nos poços de monitoramento. Por isto, decidiu-se realizar uma análise complementar com o uso da precipitação, cujo resultado está ilustrado nos mapas da Figura 8.

Figura 8 - Distribuição espacial da precipitação na área de estudo do ano de 2015 até 2022.



Fonte: os autores (2024).

Complementando a análise usando a precipitação, é possível perceber que o ano de 2017 apresentou o menor índice na região de estudo. De modo geral, o ano de 2015 apresentou resultados mais elevados que os demais. Essa diminuição percebida entre os anos de 2015 e 2022 pode ser uma das explicações para a diminuição do armazenamento da água subterrânea (conforme Figura 7 e Quadro 2), em conjunto com os resultados do avanço da agropecuária.

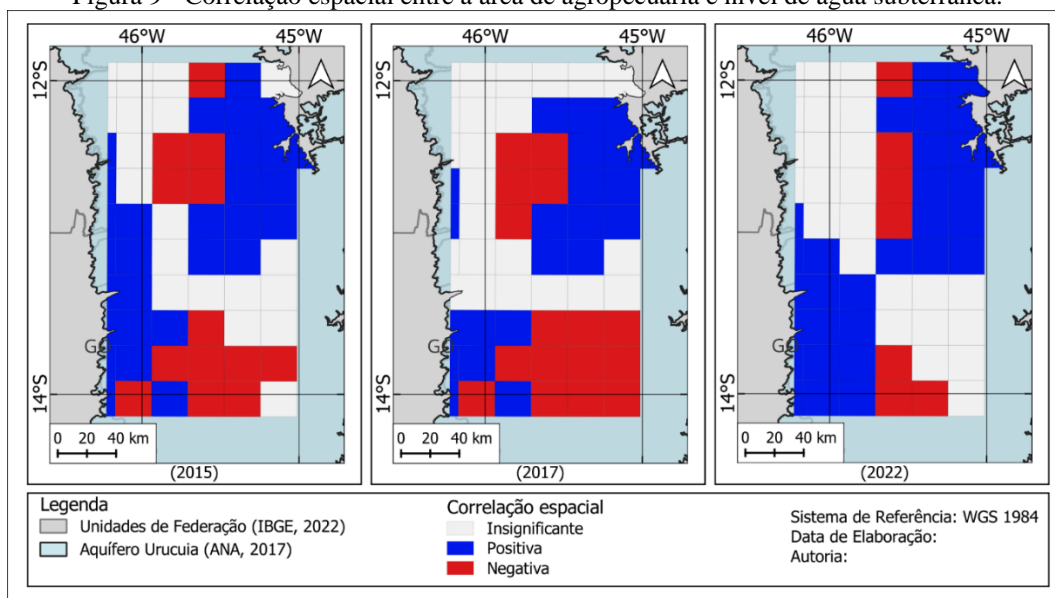
Segundo documento publicado pela Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (2017), um período de seca afetou o estado entre os anos de 2016 e 2017. Neste período, 217 municípios decretaram estado de emergência, a maioria localizada no semiárido baiano, porém, esse fenômeno climático pode ter sido o motivo dos baixos índices de precipitação encontrados para o ano de 2017 na região de estudo deste trabalho.

Para aprimorar as análises executadas, analisou-se a correlação espacial entre os conjuntos de dados, conforme apresentado na Subseção 3.3.2 que segue.

3.3 Correlação espacial

A correlação espacial aplicada neste trabalho foi realizada a partir da aplicação do índice de Moran Local bivariado implementado no software GeoDa. Neste método, os resultados são apresentados de três formas: o mapa de *cluster*, o mapa de significância e o gráfico de dispersão de Moran. Na análise em questão foi utilizado o mapa de *cluster*, que ilustra, através de uma paleta de cores, os locais onde a correlação espacial é positiva, negativa ou inexistente (Figura 9).

Figura 9 - Correlação espacial entre a área de agropecuária e nível de água subterrânea.

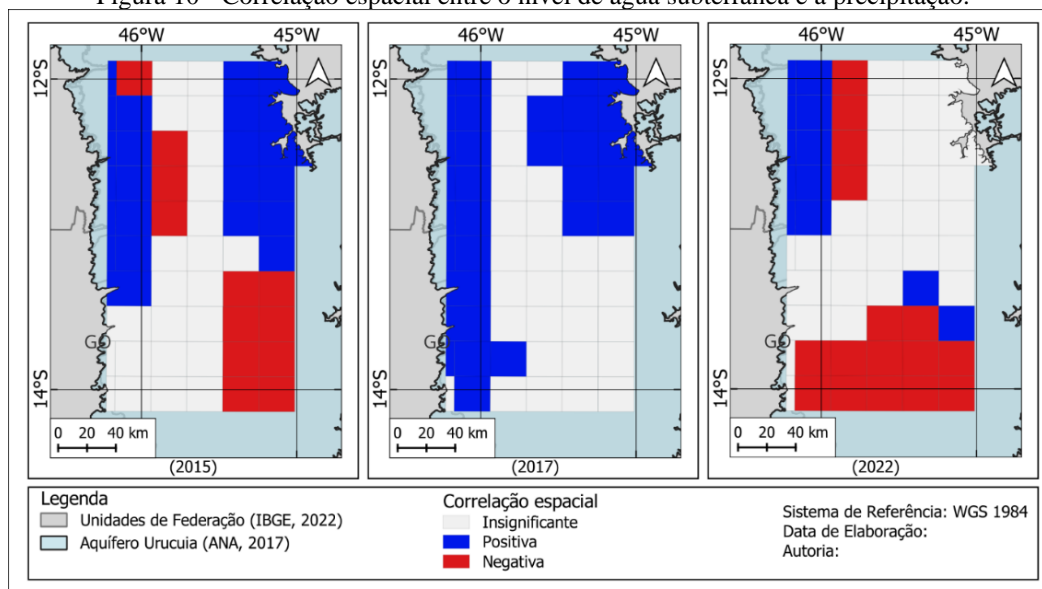


Fonte: os autores (2024).

Observa-se na Figura 9 que a correlação espacial positiva representa os locais em que existe concentração de áreas classificadas como agropecuária e altos valores de armazenamento de água. Nos locais com correlação espacial negativa, há uma pequena presença da classe de agropecuária no uso e ocupação do solo e baixos valores de armazenamento de água subterrânea, ou vice-versa. Na correlação espacial insignificante, não foi encontrada associação entre os dois índices.

O resultado encontrado na Figura 9 ilustra que não há uma correlação espacial clara entre o aumento da agropecuária e a diminuição dos níveis de armazenamento de água subterrânea, visto que a correlação espacial positiva e insignificante se sobressaem com relação à correlação espacial negativa. Seguindo com as análises de correlação espacial, o próximo passo foi entender se era possível observar uma associação dos níveis de água subterrânea com os valores de precipitação e o resultado é apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Correlação espacial entre o nível de água subterrânea e a precipitação.



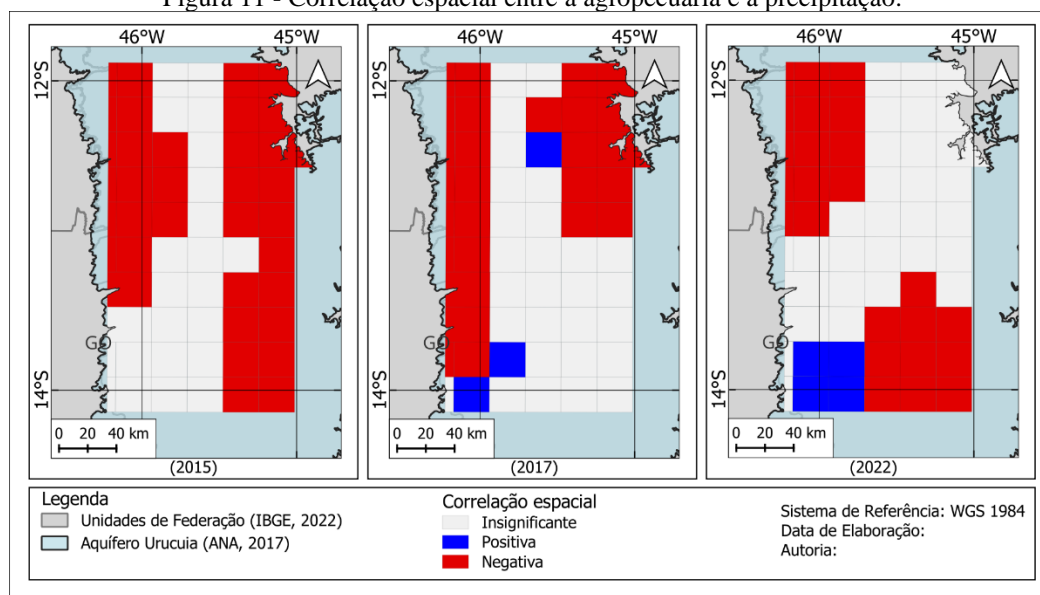
Fonte: os autores (2024).

Neste quesito, é possível perceber que no ano de 2017, no qual ocorreram os menores índices de precipitação (Figura 8), não houveram aparições de correlações negativas, ou seja, o nível de água subterrânea acompanhou os índices de precipitação. Nos demais anos, correlações negativas se mostraram ao longo da região de estudo, de maneira equilibrada com a correlação positiva. Neste caso, os níveis de água subterrânea podem não refletir o aumento ou diminuição da precipitação daquele mesmo ano. No ano de 2017, pode ter ocorrido a diminuição de ambos porque o período de seca se estendida desde o ano de 2016, conforme

documento da Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (2017) citado na Subseção 3.2.

Por fim, foi realizada a análise da correlação espacial da área de agropecuária com os valores normalizados de precipitação. Os resultados são apresentados na Figura 11.

Figura 11 - Correlação espacial entre a agropecuária e a precipitação.



Fonte: os autores (2024).

Neste caso, é possível perceber uma correlação espacial negativa mais evidente do que nas análises anteriores. A presença da agropecuária numa região aparenta ter mais consequências para a precipitação do que no armazenamento de água subterrânea, por conta do impacto do desmatamento de vegetação nativa no ciclo hidrológico da localidade. Um estudo realizado por Campos e Chaves (2020) buscou entender a variação histórica de precipitação no Cerrado brasileiro entre os anos de 1977 e 2010 e foi observado que das 125 estações pluviométricas estudadas, 89 apresentaram tendências de redução na precipitação média anual, sendo que 18 estações mostraram queda estatisticamente significativa e os autores concluem que efeitos do desmatamento sobre a precipitação do Cerrado parecem ser relevantes, uma vez que mais da metade da vegetação nativa do bioma foi convertida em outros usos ao longo desses anos.

4 CONCLUSÕES

De modo geral, usando a metodologia proposta, não foi possível afirmar que a quantidade de área ocupada com agropecuária nessa região teve efeito direto no armazenamento de água subterrânea no local. Diversos fatores podem ter contribuído para tal retorno, dentre eles é possível que o impacto do uso de água para irrigação não seja tão grande quanto o esperado, ou ainda, que esses impactos não sejam observados dentro de um mesmo ano, sendo necessária a avaliação da correlação espacial entre anos distintos.

Porém, em contrapartida, os resultados de correlação espacial entre a área de agropecuária e índices de precipitação se mostraram positivos, indicando assim que o impacto da agropecuária numa região está mais relacionado com o desmatamento da vegetação nativa para sua implantação do que com o uso da água para irrigação.

Para trabalhos futuros é possível realizar testes com uma grade de vetorização dividindo a área de estudo em regiões ainda menores, de modo a entender se, desta forma, as correlações espaciais teriam um resultado diferente. Além disso, existem outros métodos de análise de armazenamento de água subterrânea, como por exemplo, os dados de satélite GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) que podem ser incorporados em análises futuras.

5 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucua e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada**. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas Irrigação 2021: Uso da Água na Agricultura Irrigada (2ª edição)**. Brasília: ANA, 2021.
- BOAVENTURA, K. DE J.; LUZ, G. A.; OLIVEIRA, M. A.; et al. **Alterações nas paisagens do Cerrado Brasileiro pela expansão da fronteira agrícola (1987–2017)**. Opción: Revista de Ciencias Humanas y Sociales, n. 89, p. 2. Facultad Experimental de Ciencias, 2019.
- BONSOR, H. C.; SHAMSUDDUHA, M.; MARCHANT, B. P.; MACDONALD, A. M.; TAYLOR, R. G. **Seasonal and Decadal Groundwater Changes in African Sedimentary Aquifers Estimated Using GRACE Products and LSMs. Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 904. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018.
- BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R. **Crescimento da agricultura no cerrado nordestino: fatores condicionantes, limites e resultados socioeconômicos**. Agricultura, Transformação Produtiva e Sustentabilidade, 2016.
- CAMPOS, J. DE O.; CHAVES, H. M. L. **Tendências e Variabilidades nas Séries Históricas de Precipitação Mensal e Anual no Bioma Cerrado no Período 1977-2010**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 35, p. 157–169. Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2020.
- CARVALHO, L. L. S. DE; LACERDA, C. F. DE; CARVALHO, C. M. DE; et al. **Variabilidade espaço-temporal da qualidade das águas subterrâneas em área irrigada no semiárido brasileiro**. Research, Society and Development, v. 9, n. 8, p. e644985786–e644985786, 2020.
- CHANU, C. S.; MUNAGAPATI, H.; TIWARI, V. M.; KUMAR, A.; ELANGO, L. **Use of GRACE time-series data for estimating groundwater storage at small scale**. Journal of Earth System Science, v. 129, n. 1, p. 215, 2020.
- DAPENG, M.; ZHONGCHANG, S.; JINYUN, G. **Estimating continental water storage variations in Central Asia area using GRACE data**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 17, n. 1, p. 012131, 2014.
- DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. **Análise de Superfícies por Geoestatística Linear**. Análise Espacial de Dados Geográficos. Brasília: EMBRAPA, 2004.
- ESQUERDO, J. C. D. M.; COUTINHO, A. C.; SANCHES, L. B.; et al. **Dinâmica da agricultura anual na região do Matopiba**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015.
- FERREIRA, A. B. R.; PEREIRA, G.; FONSECA, B. M.; CARDOZO, F. DA S. **As Mudanças no Uso e Cobertura da Terra na Região Oeste da Bahia a Partir da Expansão Agrícola**. Formação (Online), v. 28, n. 53, 2021.
- FORUM, W. E. **The Global Risks Report 2021**. Geneva: World Economic Forum, 2021.
- GREEN, T. R.; TANIGUCHI, M.; KOOI, H.; et al. **Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater**. Journal of Hydrology, v. 405, n. 3, p. 532–560, 2011.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Banco de dados meteorológicos**. 2023.
- KUHN, I. A.; GENRO, L. V.; RÖRIG, F. S.; REGINATO, P. A. **Análise do comportamento do nível da água em poços de monitoramento da RIMAS na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria, Rio Grande do Sul**. Working Paper, ABAS, 2022.
- LEDERER, E. M. **Next UN assembly president warns world in dangerous crisis**. 2022.
- LUIZ, T. B. P.; SCHRÖDER, T.; SILVA, J. L. S. **Previsão de Níveis Estáticos de Água Subterrânea em Poço de Monitoramento Utilizando Metodologia Estocástica**. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, v. 40, n. 2, p. 53–60, 2017.
- LUZARDO, A. J. R.; FILHO, R. M. C.; RUBIM, I. B. **Análise Espacial Exploratória com o Emprego do Índice de Moran**. GEOgraphia, v. 19, n. 40, p. 161–179, 2017.

- MOHANTY, S.; JHA, M. K.; KUMAR, A.; SUDHEER, K. P. **Artificial Neural Network Modeling for Groundwater Level Forecasting in a River Island of Eastern India**. *Water Resources Management*, v. 24, n. 9, p. 1845–1865, 2010.
- NETO, D. C. **Análise das séries temporais de monitoramento de nível d'água em poços no aquífero Rio Claro**, 25. ago. Dissertação de Mestrado, Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 2006.
- OUMA, Y. O.; ABALLA, D. O.; MARINDA, D. O.; TATEISHI, R.; HAHN, M. **Use of GRACE time-variable data and GLDAS-LSM for estimating groundwater storage variability at small basin scales: a case study of the Nzoia River Basin**. *International Journal of Remote Sensing*, v. 36, p. 5707–5736, 2015.
- PEIXOTO, F. DA S.; CAVALCANTE, I. N. **Vulnerabilidade aquífera e risco de contaminação da água subterrânea em meio urbano**. *Geologia USP. Série Científica*, v. 19, n. 2, p. 29–40, 2019.
- PEREIRA, G. W.; VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M. DE; et al. **Smart-Map: An Open-Source QGIS Plugin for Digital Mapping Using Machine Learning Techniques and Ordinary Kriging**. *Agronomy*, v. 12, n. 6, p. 1350. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022.
- PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. 2023.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. 2023.
- SANTOS, C. A. P. D.; SANO, E. E.; SANTOS, P. S. **Fronteira Agrícola e a Dinâmica de Uso e Ocupação dos Solos no Oeste da Bahia**. *ACTA GEOGRÁFICA*, v. 12, n. 28, p. 17–32, 2018.
- SANTOS, R. S. **Saúde e Qualidade da Água: Análises Microbiológicas e Físico-Químicas em Água Subterrâneas**. *Revista Contexto & Saúde*, v. 13, n. 24–25, p. 46–53, 2013.
- SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO (CPRM). **Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas**. 2023.
- SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Impactos da seca no estado da Bahia no biênio: 2016 - 2017**. SEI, 2017.
- UNIVERSITY OF CHICAGO. **GeoDa**. 2023.
- XIAO, R.; HE, X.; ZHANG, Y.; FERREIRA, V. G.; CHANG, L. **Monitoring Groundwater Variations from Satellite Gravimetry and Hydrological Models: A Comparison with in-situ Measurements in the Mid-Atlantic Region of the United States**. *Remote Sensing*, v. 7, n. 1, p. 686–703. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA
Rua Prof. Aristides Neves nº 2 Federação - CEP 40.210-670 - Salvador - Bahia
e-mail: agrimensura@ufba.br

ENGJ43 - TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO II
FICHA DE AVALIAÇÃO

ALUNO: Stephane Narde Lopes Vasconcelos	
TÍTULO: Análise espacial do nível de água em poços de monitoramento e sua relação com o uso e ocupação do solo na região do Aquífero Urucuia	
ORIENTADOR(A):	Professor Fabiano Peixoto Freiman
AVALIADOR 1:	Dr.ª Laís Thie Hasuda Nakao
AVALIADOR 2:	Professora Patrícia Lustosa Brito

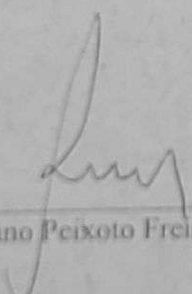
Avaliação da Banca

	ORIENTADOR	AVALIADOR 1	AVALIADOR 2
Conceito por avaliador	APROVADA	APROVADA	APROVADA


Conceito final da banca: APROVADO(A) () REPROVADO(A) () Aprovação condicionada ao atendimento das observações

Correções necessárias: () Não (X) Sim - Prazo: 7 dias

Salvador, 04 de setembro de 2024.



Professor Fabiano Peixoto Freiman - (UFBA)



Oceanógrafa Dr.ª Laís Thie Hasuda Nakao



Professora Patrícia Lustosa Brito (UFBA)