



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Impacto das Mudanças da Cobertura e Uso da Terra nos Processos Hidrológicos da Bacia Hidrográfica do Rio Pojuca, Bahia, Brasil

Thiago Hiroshi de Oliveira, Vinícius de Amorim Silva²

¹ Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) e analista ambiental da Empresa Baiana de Águas e Saneamento – Embasa S.A. Rua Alphaville, 199, Salvador/BA. CEP: 41701-015. E-mail: kurthiago@gmail.com. - <https://orcid.org/0000-0001-6077-0822>. ² Professor Associado II da Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), Centro de Formação em Tecnociências e Inovação, Campus Jorge Amado (CJA). Rodovia Ilhéus/Itabuna, Km 22, CEP: 45.604-811, Ilhéus/Ba. E-mail: vinicius@ufsb.edu.br - <https://orcid.org/0000-0001-5814-9199>.

Artigo recebido em 20/07/2024 e aceite em 28/10/2024

RESUMO

Ao produzirem transformações em larga escala nas bacias hidrográficas que ocupam, as sociedades impactam decisivamente nos processos hidrológicos, causando alterações na qualidade e na quantidade de água disponíveis para o atendimento às múltiplas demandas. O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência das mudanças da cobertura e uso da terra na produção de água e sedimentos da bacia hidrográfica do rio Pojuca, no estado da Bahia. A evolução da cobertura e uso da terra nessa bacia foi avaliada no período entre 1985 e 2020 e foram construídos quatro cenários: (i) Recuperação de Área de Preservação Permanente - APP, (ii) Desmatamento total, (iii) Reflorestamento total e (iv) Tendencial – 2055. O modelo foi calibrado utilizando-se dois métodos distintos: (i) Single Site Calibration – SSC e (ii) Simultaneous Multi-site Calibration – SMSC. A maioria dos índices estatísticos de desempenho atestou a capacidade do modelo calibrado com ambos os métodos de simular de forma adequada as vazões e sedimentos no exutório da bacia. Em relação aos resultados de vazão em um ponto intermediário da bacia, o modelo calibrado com o método SMSC apresentou desempenho superior ao método SSC. A simulação dos diferentes cenários indicou que o reflorestamento total da bacia resultou em crescimento nas vazões médias (15%), vazões mínimas (11%), escoamento de base (18%) e recarga para o aquífero profundo (17%). O cenário tendencial para 2055 indicou um aumento de 25% no escoamento superficial. O comportamento da bacia quanto à produção de vazões e sedimentos se mostrou pouco variável entre os cenários.

Palavras-Chaves: Geoprocessamento; Modelagem Hidrológica; Sistemas Ambientais; SWAT.

Impact of Land Cover and Land Use Change on Hydrological Processes in the Pojuca River Basin, Bahia, Brazil

ABSTRACT

When societies undertake large-scale transformations in the hydrographic basins they occupy, they decisively impact hydrological processes, causing changes in the quality and quantity of water available to meet multiple demands. The present study aims to analyze the influence of changes in land cover and land use on water and sediment production in the Pojuca river watershed, in the state of Bahia. The evolution of land cover and land use in this watershed was evaluated for the period between 1985 and 2020, and four scenarios were constructed: (i) Recovery of Permanent Preservation Area - APP, (ii) Total Deforestation, (iii) Total Reforestation, and (iv) Trend - 2055. The model was calibrated using two different methods: (i) Single Site Calibration - SSC and (ii) Simultaneous Multi-site Calibration - SMSC. Most of the performance statistical indices confirmed the ability of the model calibrated with both methods to adequately simulate flows and sediments at the basin outlet. Regarding flow results at an intermediate point in the basin, the model calibrated with the SMSC method showed superior performance to the SSC method. Simulation of the different scenarios indicated that total reforestation of the basin resulted in growth in mean flows (15%), minimum flows (11%), base flow (18%), and recharge to the deep aquifer (17%). The trend scenario for 2055 indicated a 25% increase in surface runoff. The basin's behavior regarding flow and sediment production showed little variability among scenarios.

Keywords: Geoprocessing; Hydrological Modeling; Environmental Systems; SWAT.

Introdução

Ao longo da História, a profunda interação entre as sociedades e os sistemas fluviais foi um fator decisivo na definição da localização geográfica dos assentamentos humanos e do próprio devir da vida cultural, social e econômica. A interface com a água influenciou o desenvolvimento de atividades produtivas, perfis de urbanização, logísticas de transporte, movimentos de lazer e turismo e expressões artísticas (Pádua e Chambouleyron, 2019), ou seja, toda a construção da sociedade contemporânea como é conhecida.

Por outro lado, as ações antropogênicas trazem severas consequências aos sistemas fluviais. Ao produzirem transformações em larga escala nas bacias hidrográficas que ocupam, por meio da alteração da cobertura e uso da terra, por exemplo, as sociedades impactam decisivamente nos processos hidrológicos e geomorfológicos, assim como nos fluxos de matéria e energia, que em conjunto dão forma e conteúdo à malha hídrica em todos os seus atributos.

Nas últimas décadas foram observadas intensas alterações na cobertura e uso da terra, em especial a conversão de florestas em áreas para uso agropecuário e em ambientes urbanos, ocasionando substanciais modificações nas componentes hidrológicas e na produção de sedimentos (Schürmann et al., 2020; Lepeška et al., 2020; França et al., 2021; Back et al., 2024).

Diante dessa complexidade enfrentada pelos gestores e tomadores de decisão, o conceito de gerenciamento integrado de recursos hídricos foi concebido no início da década de 1990 a partir da reflexão sobre um novo paradigma de gestão que fizesse frente ao contexto de escassez hídrica, degradação da qualidade da água, mudanças climáticas e fragmentação e desarticulação de ações setoriais (Unesco, 2009; Hossoda, Tercini e Garcia., 2024).

Para tanto, pensou-se necessário um processo de gerenciamento coordenado da água, do território e de todos os outros aspectos relacionados, visando à maximização da resultante econômica e do bem-estar social, de uma forma inclusiva e igualitária, sem comprometer os ecossistemas vitais. Posteriormente, a gestão integrada de recursos hídricos foi inserida no âmbito do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável - ODS 6 (Água potável e Saneamento) como uma meta a ser perseguida em todos os níveis até 2030 (ONU, 2015). Apesar dos avanços observados nas últimas décadas, a gestão integrada de recursos hídricos ainda enfrenta grandes

desafios relacionados à falta de integração com os instrumentos de planejamento territorial (Medeiros e Lucena, 2023).

Sob esse prisma, foi construída a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH (Lei Federal 9.433/1997), conhecida como Lei das Águas, que instituiu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH, formado por instâncias colegiadas e órgãos executores, com destaque para a criação dos Comitês de Bacia Hidrográfica. A PNRH determinou como uma das diretrizes gerais de ação “a articulação da gestão de recursos hídricos com a de uso do solo” e determinou que os Planos de Recursos Hídricos devem, obrigatoriamente, considerar as “modificações dos padrões de ocupação do solo”.

Para assegurar que todos os múltiplos aspectos da água sejam considerados na gestão do recurso hídrico, é necessária a existência de sistemas de suporte à decisão que agreguem bases de dados de diferentes naturezas e modelos matemáticos que construam e analisem cenários, com o intuito de permitir que o usuário avalie diversas alternativas e tome a decisão que maximize o interesse coletivo, o que remete à modelagem hidrológica de bacias hidrográficas (Lopes et al, 2021; Silva et al, 2024).

Um modelo hidrológico é uma ferramenta capaz de entender e simular processos em uma bacia hidrográfica, permitindo então a simulação de condições diferentes daquela observadas (Tucci, 2005; Muhury et al., 2024). Essa simulação pode ser extremamente útil para planejar atividades necessárias à melhoria ambiental e ao atendimento a requisitos legais, bem como correlacionar cenários às respostas do sistema, permitindo identificar as diretrizes de ação no presente mais adequadas ao alcance dos objetivos futuros, gerindo os conflitos existentes e buscando garantir o atendimento às demandas dos múltiplos usuários (Von Sperling, 2014; Lopes et al., 2021; Zewde et al., 2024).

O Soil and Water Assessment Tool (SWAT) é um modelo hidrológico em escala de bacia hidrográfica que correlaciona a cobertura e uso da terra com a qualidade e quantidade da água. Ele é largamente utilizado no mundo desde a década de 1990 para avaliar a influência de processos de conversão do uso da terra, práticas agrícolas e mudanças climáticas nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, sendo utilizado para simular longos períodos. O SWAT é capaz de modelar tanto fontes difusas, quanto

pontuais de poluição (Neitsch et al., 2011; Aloui et al., 2023).

O SWAT é aplicado a diversos contextos envolvendo recursos hídricos e gestão territorial, sendo uma ferramenta flexível e eficaz (Gassman, 2014). O referido modelo computacional simula as respostas hidrológicas de diferentes cenários de cobertura e uso da terra em uma bacia hidrográfica, proporcionando indicações sobre como a ocupação territorial influencia a qualidade e a quantidade dos recursos hídricos disponíveis para os múltiplos usos (Martins et al, 2021; Demissie, 2022; Costa et al. 2023).

No entanto, o SWAT possui limitações que podem comprometer a qualidade de seus resultados. Seu caráter semi-distribuído ocasiona simplificações na modelagem da relação entre cobertura e uso da terra com os processos hidrológicos, visto que a ferramenta trabalha com unidades territoriais de tamanho variado e com baixo nível de interação entre elas, sendo que muitos processos são computados em nível de sub-bacias, muitas vezes de grandes extensões (Meng et al., 2018; Abbas et al., 2024).

Além disso, o método de calibração utilizado impacta diretamente no desempenho do modelo e em sua capacidade de representar de forma fidedigna os processos que ocorrem no interior da bacia hidrográfica. A literatura científica indica algumas opções de métodos de calibração, cuja seleção é limitada pela disponibilidade de estações de medição e de séries de dados com consistência e continuidade adequadas.

A escolha do método de calibração mais apropriado é particularmente importante na modelagem de bacia hidrográficas cujos atributos possuem elevada variabilidade espacial (Sanchez-Gomez et al., 2022; Gelete et al., 2023).

O método de calibração mais utilizado ao longo dos anos foi o Single Site Calibration (SSC), considerando dados observados em um ponto da bacia hidrográfica, em geral seu exutório. No entanto, a aplicação do método SSC em bacias com alto grau de variabilidade espacial deve ser avaliada com ressalvas, visto que os parâmetros obtidos pela calibração podem não representar adequadamente os processos hidrológicos que ocorrem no interior da bacia (Nkiaka et al. 2018; Franco et al., 2020; Harifidy, 2024).

Como alternativa, utilizar-se métodos de calibração que se valem dos dados observados de vazão em diferentes partes da bacia, como é o caso do método de calibração simultânea multi-sítio (Simultaneous Multi-Site Calibration - SMSC). Dessa forma, a consideração da variabilidade espacial é favorecida e minimiza-se a possibilidade de que a calibração resulte em parâmetros irrealistas (Leta et al, 2017; Makumbura et al., 2022).

O presente trabalho tem como objetivo de analisar a influência das mudanças da cobertura e uso da terra na produção de água e sedimentos na bacia do rio Pojuca, no estado da Bahia. Avalia-se a evolução da cobertura e uso da terra nessa bacia hidrográfica no período entre 1985 e 2020, fornecendo base para a construção de diferentes cenários, simulados com o SWAT. Utiliza-se métodos distintos de calibração e avalia-se o desempenho do modelo a partir de cada método, tecendo-se considerações sobre a aplicabilidade desses métodos em bacias hidrográficas com alta variabilidade espacial.

Material e Métodos

Localização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Pojuca é situada no estado da Bahia, na Região de Planejamento e Gestão das Águas XI (RPGA XI), denominada Recôncavo Norte e Inhambupe. O rio Pojuca, que é o maior rio em extensão dessa RPGA, com cerca de 200 km de extensão, nasce na Serra da Mombaça, no município de Santa Bárbara, e desemboca entre as vilas de Praia do Forte e Itacimirim, constituindo-se no divisor físico dos municípios de Camaçari e Mata de São João (CRA, 2005).

A bacia hidrográfica do rio Pojuca abrange 4.790,51 km² de área total, engloba os limites territoriais de 22 municípios e 16 sedes municipais. Em 2017, a população residente na bacia é estimada em 669.898 habitantes, com uma taxa de crescimento anual de 1,5%. Os índices pluviométricos presentes na bacia apresentam uma grande amplitude, variando de 800 mm anuais nas cabeceiras até 1.700 mm na foz. (INEMA, 2018), Figura 1.

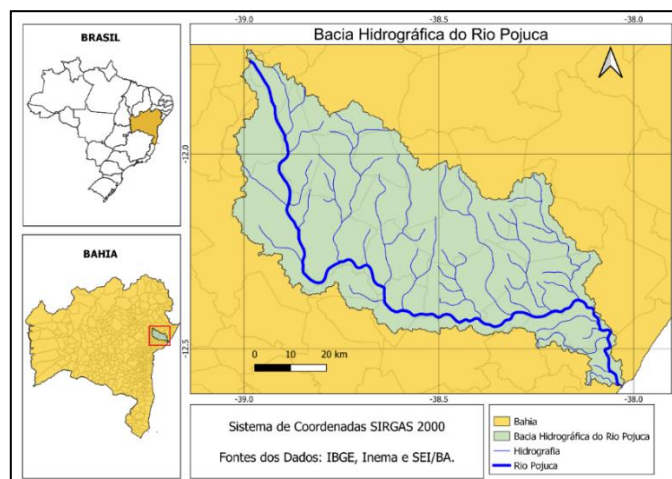


Figura 1 - Bacia hidrográfica do rio Pojuca. Elaboração: os autores.

Os biomas presentes são a Caatinga e a Mata Atlântica. Já os solos predominantes são os Argissolos Vermelho-Amarelos, que abrangem 67,3 % da área de estudo. Os solos dessa classe apresentam horizonte B textural e argila de atividade baixa, não hidromórficos. Exibem sequência de horizontes A, Bt e C, com maior ocorrência de horizonte A fraco a moderado e de classe de textura média e textura argilosa no horizonte Bt, são solos profundos a muito profundos e que variam de moderado a fortemente ácidos (BAHIA, 2004)

A região tem atividades econômicas associadas à agropecuária, destacando-se a avicultura e a bovinocultura. A substituição da cobertura vegetal nativa por pastagens e áreas agrícolas é um fenômeno que ocorre desde o início da ocupação da bacia. A exploração de petróleo, silvicultura (eucalipto) e a expansão urbana destacam-se como principais aspectos ambientais. Estimativas indicaram que a bacia tem apenas 9% da área de vegetação nativa original, concentrada em sua porção inferior. Apenas 0,58% da área total da bacia do rio Pojuca (27,58 km²) é protegida com alguma categoria de Unidade de Conservação (INEMA, 2018).

Etapas da modelagem

O SWAT inicialmente utiliza o Modelo Digital de Elevação (MDE) para delinear a bacia hidrográfica de interesse, define-se as sub-bacias e a rede de drenagem. O próximo passo é a inclusão no modelo dos mapas de tipos de solo, de cobertura e uso da terra e a definição das classes de declividade. O modelo define então as Unidades de Resposta Hidrológica ou *Hidrological Response Units* (HRUs), que são porções da bacia hidrográfica que possuem as mesmas

características em termos de tipo de solo, uso da terra e declividade.

A modelagem de todos os processos se dá no nível das HRUs. Inserem-se, então, os dados climáticos (obtidos em estações reais de monitoramento ou gerados pelo próprio), o SWAT executa todos os cálculos envolvidos na simulação dos processos que ocorrem na bacia hidrográfica e fornece os resultados da simulação (qualidade, quantidade e fluxos da água).

Para a construção do MDE da bacia do rio Pojuca utiliza-se quatro cenas do *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM Global com resolução de 1 arco de segundo (30 metros), disponíveis no site “EarthExplorer” do *United States Geological Service* - USGS. Para o recobrimento total da bacia do rio Pojuca utiliza-se as cenas referentes às coordenadas S12/W039, S12/W040, S13/W029 e S13/W040.

Utiliza-se como base o mapa de cobertura e uso da terra referente ao ano de 2006 da Coleção 6 do projeto Mapbiomas (2022). Esse ano foi selecionado por estar situado dentro do período de dados utilizados para calibração do modelo. Já para a criação do mapa de entrada do modelo SWAT é necessária a compatibilização das classificações de cobertura e uso da terra utilizadas no projeto Mapbiomas com aquelas consideradas no SWAT. A adaptação das especificações associadas às classes de ocupação do solo relativas a floresta, cerrado e pastagem à realidade brasileira, os coeficientes curva número (CN) presentes no banco de dados referenciais do SWAT são alterados tendo como referência os valores apresentados por Santos e Lollo (2016).

A Figura 2 resume as etapas envolvidas na modelagem com o SWAT.

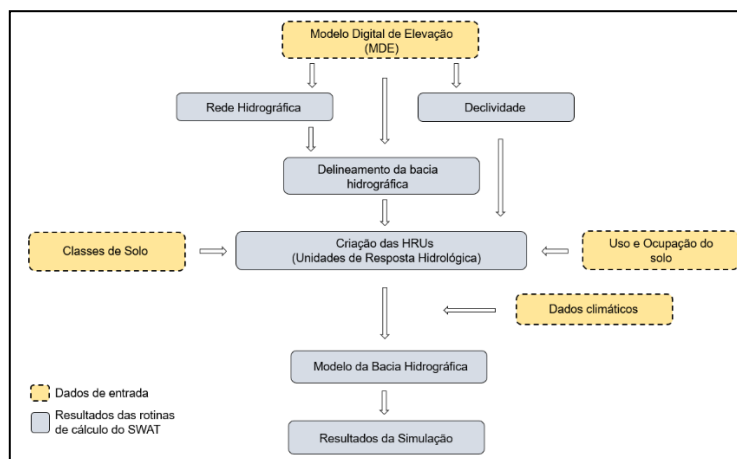


Figura 2 - Fluxograma das etapas de modelagem (SWAT). Fonte: Adaptado de Srinivas e Gopal (2017).

Os solos da bacia hidrográfica do rio Pojuca foram classificados a partir da base de dados do Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH (2004), que tem como principal referência o Projeto RADAMBRASIL.

Para cada tipo de solo identificado na bacia do rio Pojuca foram obtidas as caracterizações detalhadas necessárias para a simulação do modelo SWAT. Silva e Medeiros (2014), Simões et al. (2021) e Costa et al. (2023) realizaram estudos de aplicação do modelo SWAT para simulações em bacias hidrográficas do Rio Paraíba, Minas Gerais e São Paulo e contribuíram com o compartilhamento de dados de entrada do modelo referentes a solos similares àqueles encontrados na bacia do rio Pojuca.

Por fim, Moreira (2019) apresentou um conjunto de procedimentos metodológicos necessários para a obtenção dos valores de cada parâmetro pedológico exigido pelo modelo SWAT para estimativa de vazões em bacias hidrográficas.

Os dados climatológicos obrigatórios para executar o modelo SWAT são temperaturas máximas e mínimas do ar (°C), velocidade do vento (m/s), umidade relativa do ar (%), radiação solar (MJ/m²) e precipitação (mm). Os dados climatológicos da bacia do rio Pojuca obtidos da Rede Meteorológica Brasileira, operada pela Agência Nacional de Águas (ANA), em parceria com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o Serviço Geológico do Brasil (SGB) e outras instituições integradas com o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) por meio do Portal HidroWeb.

Também são considerados os dados da estação meteorológica Lamarão, operada pela CETREL, que fica próxima da bacia do rio Pojuca (15 km de distância). As estações de monitoramento hidroclimático utilizadas na construção e calibração do modelo são apresentadas na Figura 3.

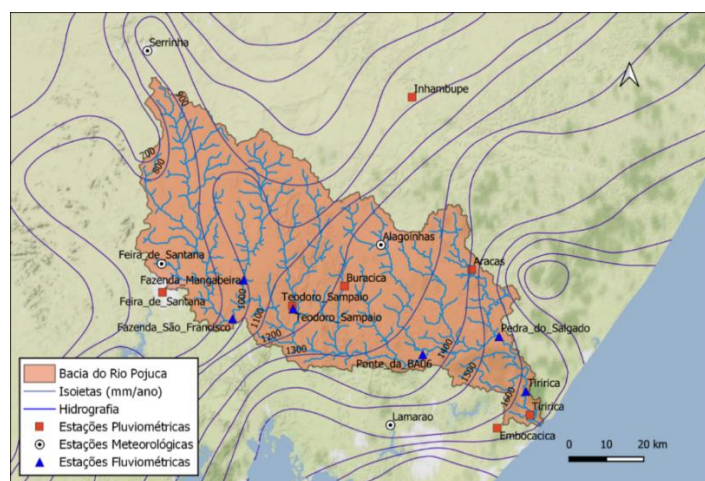


Figura 3 - Estações de monitoramento hidroclimático. Elaboração: os autores.

Calibração e Validação

A calibração e a validação do modelo são realizadas com o software SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Programs for SWAT) versão 5.1.6.2 (gratuita). Foram utilizados os métodos de calibração Single Site Calibration (SSC) e Simultaneous Multi-Site Calibration (SMSC), descritos por Leta et al (2017) e Nkiaka et al. (2018).

A calibração no método SSC realizada com base na estação fluviométrica Tiririca (cód. 50795000), localiza-se próxima ao exutório (área de drenagem correspondente a 98% da área total da bacia). No método SMSC considerada-se adicionalmente a estação Ponte da BA-06 (cód. 50755000), cuja área drenagem corresponde a 67% da área total da bacia. As outras estações fluviométricas possuem séries históricas com grandes descontinuidades, o que impede que sejam consideradas na calibração.

As redes de monitoramento pluviométrico e meteorológico presentes na bacia hidrográfica do rio Pojuca proporcionaram a construção de séries históricas de precipitação, temperaturas mínimas e máximas, umidade, radiação e velocidade do vento para o período entre os anos 2001 e 2020, é considerado como o período total da simulação. Como forma de abarcar condições hidrológicas equivalentes nas etapas de calibração e validação, determinou-se o período de 2001 a 2014 para a calibração e 2015 a 2020 para validação, com um período de aquecimento de 4 anos, compatível com o recomendado por Abbaspour (2015).

Não há estações de medição de descarga sólida (sedimentos) na bacia hidrográfica do rio Pojuca. Por esse motivo, para ser possível realizar a calibração do modelo hidrológico em relação aos sedimentos foram utilizados dados do monitoramento da qualidade da água da Empresa Baiana de Águas e Saneamento – Embasa, empresa estadual responsável pela prestação de serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Com base em dados de sólidos em suspensão em 111 datas distintas entre 2006 e 2016 e das vazões medidas na estação fluviométrica Tiririca (CPRM) situadas nas proximidades dos pontos de coleta da Embasa, foi possível gerar a curva chave de descarga sólida em função da descarga líquida, conforme metodologia apresentada por Menezes e Marcuzzo (2018). A partir dessa curva, foi gerada a série de dados de descarga sólida mensal utilizada na calibração do modelo.

Desse modo, considera-se a carga sólida em suspensão como equivalente à carga total de

sedimentos transportada pelo corpo hídrico, desconsiderando as componentes de fundo (arrasto e saltante), dada a ausência de dados medidos em campo. Considerou-se também que não há variação espacial significativa vertical e horizontalmente na concentração de sólidos em suspensão no corpo hídrico e que as coletas realizadas pela Embasa na margem do rio são representativas da concentração média na seção.

Importante destacar que essas premissas simplificadoras incorporam incertezas aos valores de descarga sólida simulados pela curva-chave, assim como a própria utilização da curva-chave. Como não há estações de monitoramento de descarga sólida na bacia do rio Pojuca, não seria possível realizar as etapas de calibração e validação do modelo. Dessa forma, optou-se por assumir as simplificações supracitadas e as incertezas dela advindas como forma de viabilizar a construção da série de dados observados e permitir a calibração e validação do modelo.

Inicialmente, realiza-se a calibração das vazões mensais e, posteriormente, a calibração da produção e transporte de sedimentos, conforme sequência indicada por Abbaspour (2015).

Cenários de cobertura e uso da terra

Com o intuito de avaliar como o perfil de cobertura e uso da terra na bacia hidrográfica do rio Pojuca pode influenciar nas vazões de escoamento e na produção e transporte de sedimentos, foram construídos quatro diferentes cenários espaciais com a utilização do *software* QGIS (versão 3.16) a serem posteriormente utilizados como elementos de entrada do modelo SWAT. Para tanto, cada cenário foi materializado em um mapa matricial (formato raster). A metodologia utilizada na construção dos cenários é descrita a seguir:

- a) Cenário base (2020) – Trata-se do mapeamento de classes de cobertura e uso da terra publicado pelo projeto MapBiomass com base em imagens de satélite do ano de 2020.
- b) APP 100 metros – Esse cenário corresponde à recomposição florestal de uma faixa de 100 metros no entorno de toda a malha hidrográfica da bacia, representando o efeito de uma Área de Proteção Permanente – APP (conforme definida na Lei Federal no 12.651/2012 para rios com largura entre 50 e 200 metros) ocupada integralmente por floresta. Todos os outros usos da terra foram mantidos iguais ao cenário base.
- c) Desmatamento total – Esse cenário corresponde à conversão em pastagem de toda área

coberta por floresta em 2020. Para tanto, no mapa de cobertura e uso da terra no formato vetorial todos os polígonos que apresentavam a tipologia de uso Formação Florestal (FRSE) tiveram seus atributos alterados para Pastagem (PAST).

d) Reflorestamento total – Esse cenário corresponde à recomposição florestal de toda a área da bacia ocupada em 2020 por pastagem. Para tanto foi utilizado o procedimento inverso do cenário anterior.

e) Cenário tendencial (2055) – Representa os tipos de cobertura e uso da terra simulados para o ano de 2055, traçados a partir das tendências de mudança no uso da terra detectadas no período entre 1985 e 2020. Para a construção desse cenário utiliza-se o *Modules for Land Use Change*

Evaluation (Molusce) versão 3.0.13, que é uma extensão gratuita para QGis (versão 2.18). O Molusce foi utilizado com essa mesma finalidade por Eshetie et al. (2023) e Tola e Deyassa (2024). O programa exige que sejam carregados como elementos de entrada dois mapas de cobertura e uso da terra em momentos distintos (utilizou-se os mapas do MapBiomass dos anos de 1985 e 2020, em formato raster) e mapas com outras variáveis espaciais que auxiliam o modelo a compreender a dinâmica das transformações espaciais. Foram utilizados mapas de declividade, hidrografia, rodovias e de localidades/sedes municipais. Após a análise das transformações ocorridas entre 1985 e 2020, o programa projetou o período de 35 anos após 2020, ou seja, que culmina em 2055.

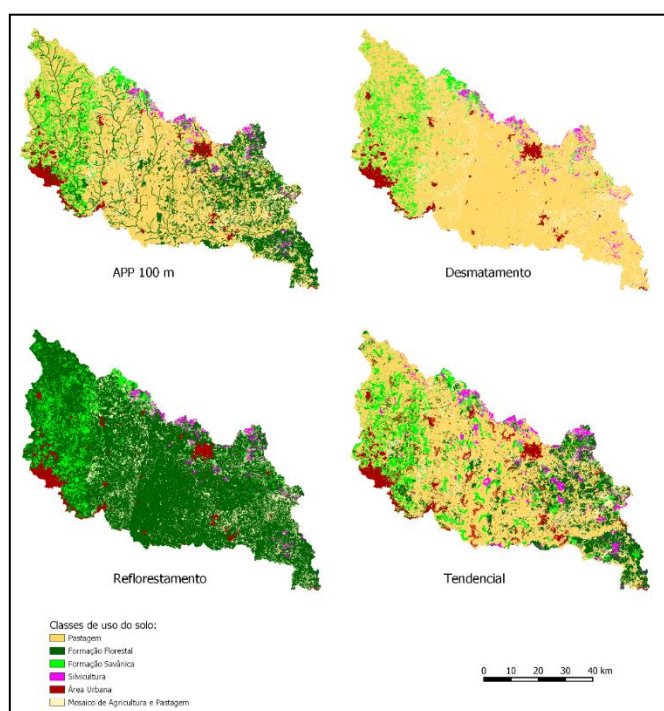


Figura 4 – Mapas dos cenários de cobertura e uso da terra. Elaboração: os autores.

Resultados e Discussão

Simulação e calibração

De posse de todos os dados de entrada requeridos pelo SWAT, foi realizada a simulação inicial da vazão mensal para o período selecionado para a calibração (2001 a 2014). Posteriormente, procedeu-se a calibração por meio do SWAT-CUP. Foram utilizados os métodos SSC e SMSC. O método SSC obteve os melhores resultados após duas iterações com 500 simulações cada uma, enquanto o método SMSC alcançou o melhor desempenho com três iterações com 500 simulações.

Os Gráficos 1, 2 e 3 apresentam os resultados das simulações de vazão com a aplicação dos métodos SSC e SMSC. O SSC realizou a calibração somente no ponto correspondente à estação fluviométrica de jusante (Tiririca) e o SMSC calibrou nos pontos correspondentes às estações de montante (BA-06) e de jusante. Já os Gráficos 4 e 5 apresentam os resultados das simulações de sedimentos. A calibração para sedimentos foi realizada nos modelos já previamente calibrados para vazão. Os dados observados de sedimentos foram oriundos da curva-chave apresentada no tópico 2.3. O período entre 2015 e 2020 foi utilizado para validar o modelo em ambas as variáveis.

Gráfico 1 – Vazões simuladas x Vazões observadas (SSC)

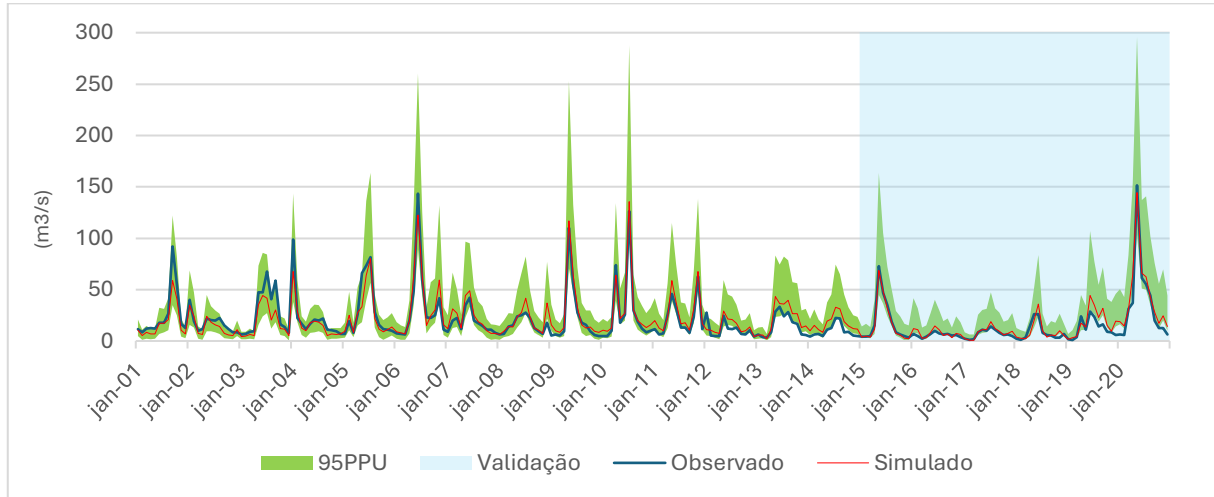


Gráfico 2 – Vazões Simuladas x Vazões observadas – Montante (SMSC)

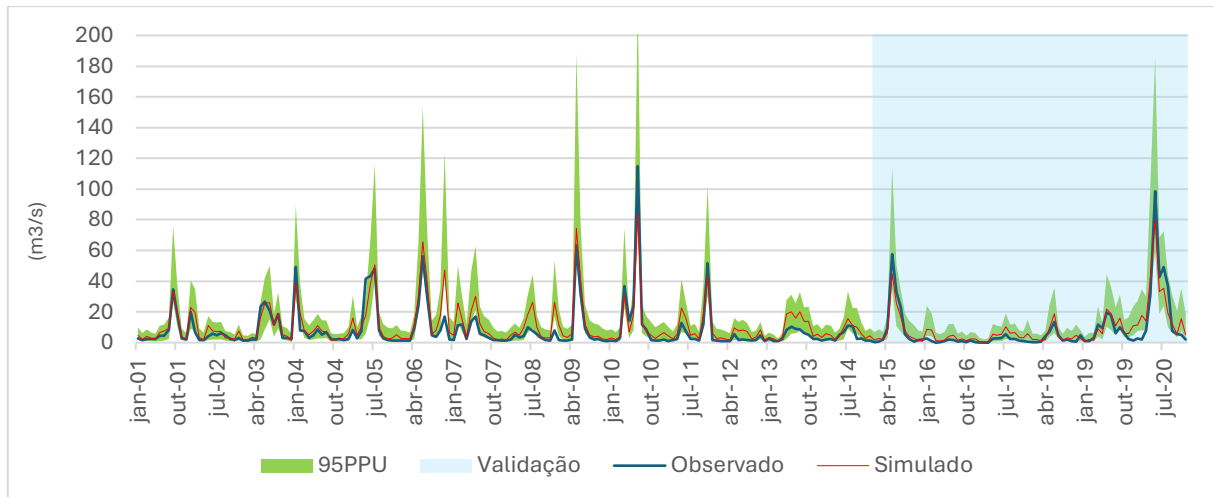


Gráfico 3 – Vazões Simuladas x Vazões observadas – Jusante (SMSC)

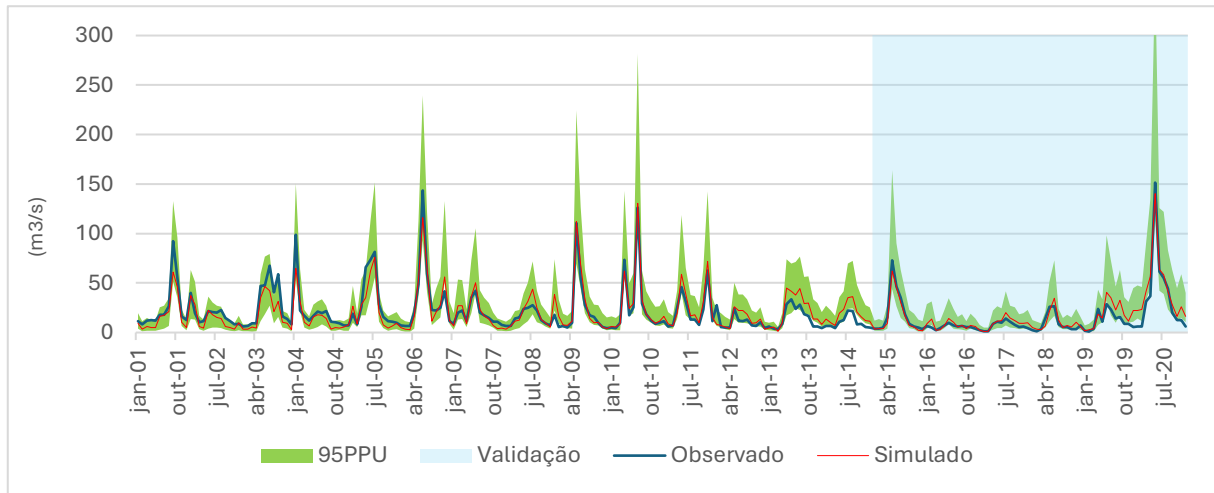


Gráfico 4 - Sedimentos simulados x Sedimentos observados (SSC)

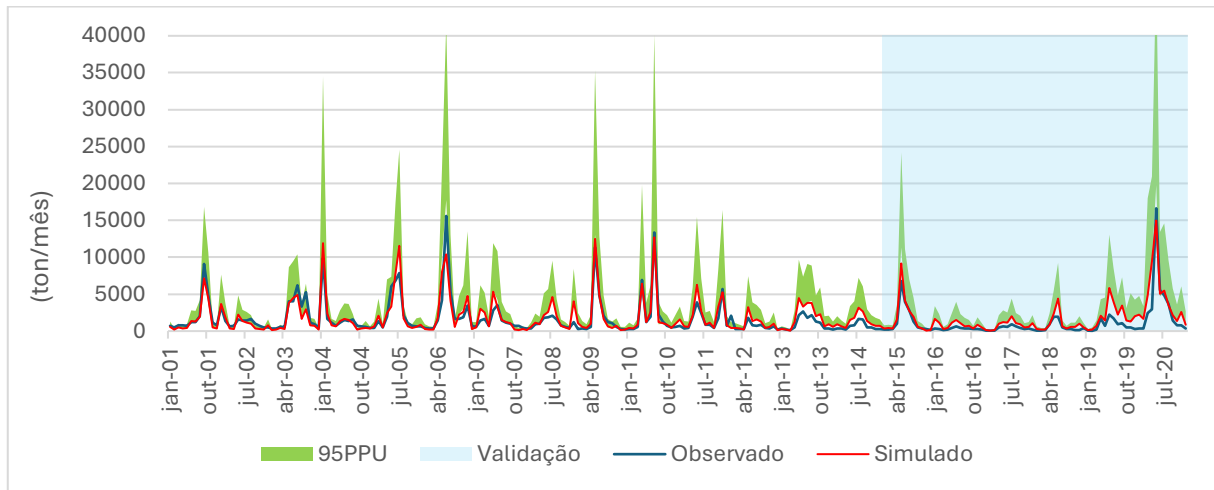
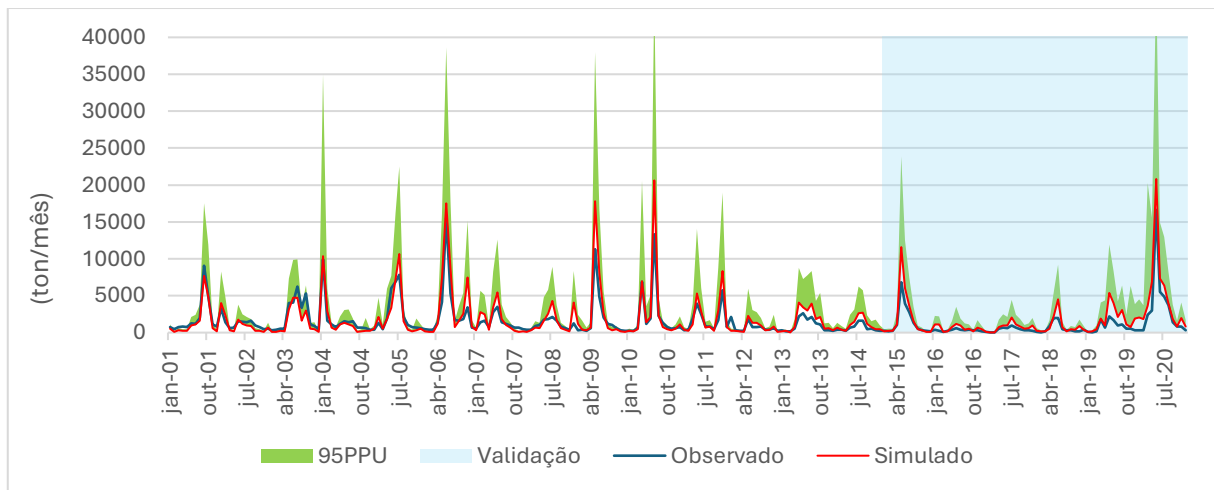


Gráfico 5 - Sedimentos simulados x Sedimentos observados (SMSC)



O desempenho dos modelos é apresentado na Tabela 1, avaliado a partir dos índices estatísticos e faixas de valores apresentados por Moriasi et al. (2007), Moriasi et al. (2015) e Abbaspour et al. (2015). A maioria dos índices indicou um desempenho adequado, com exceção do PBIAS que indicou tendência a superestimar os

valores de vazão e sedimentos, principalmente na etapa de validação. A Tabela 1 demonstra que as calibrações com os métodos SSC e SMSC não apresentaram diferenças significativas de desempenho na simulação de vazões e sedimentos no ponto de jusante.

Tabela 1 - Classificação de desempenhos dos modelos

			NS	R2	RSR	PBIAS	P-factor	R-factor
SC	Vazão (jusante)	Calibração	0.86	0.87	0.37	-3.2	0.85	0.91
		Validação	0.91	0.93	0.29	-16.8	0.69	0.88
	Sedimento	Calibração	0.82	0.83	0.43	-9.3	0.29	0.34
		Validação	0.69	0.82	0.43	-59.1	0.14	0.35
SMSC	Vazão (montante)	Calibração	0.8	0.83	0.45	-31.2	0.86	0.87
		Validação	0.87	0.9	0.36	-12	0.63	0.75
	Vazão (jusante)	Calibração	0.85	0.85	0.39	1.9	0.87	0.89
		Validação	0.9	0.92	0.31	-18.3	0.81	0.93
	Sedimento	Calibração	0.73	0.89	0.52	-11.7	0.23	0.23
		Validação	0.7	0.94	0.55	-59.7	0.21	0.24

Bressiani et al (2015) concluíram que 61% de um conjunto de 31 estudos utilizando o SWAT para simular vazões mensais obtiveram performances do índice de Nash-Sutcliffe (NSE) superiores a 0,75, consideradas muito boas conforme classificação de Moriasi et al. (2007). Já em outra classificação de Moriasi et al. (2015) esse desempenho situa-se na faixa de bom ou muito bom.

Resultados similares foram obtidos por Santos et al. (2019) ao modelar com o SWAT a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, na Bahia, obtendo PBIAS variando entre -14,0 e 4,2 (de satisfatório a muito bom), R2 entre 0,80 e 0,85 (bom) e RSR entre 0,32 e 0,40 (muito bom). Ferraz et al. (2021) simularam com o SWAT as vazões mensais do rio Correntina, no Oeste do estado da Bahia, e obtiveram PBIAS entre -3,95 e 0,5 (muito

bom), NSE entre 0,57 e 0,64 (satisfatório) e R2 entre 0,74 e 0,76 (bom).

O indicador PBIAS na etapa de validação indicou uma tendência do modelo em superestimar as vazões a partir de 2015. Esse fato pode ser decorrente na mudança no perfil de precipitação no período da validação (2015 – 2020) em relação ao período da calibração (2001 – 2014). Em ambos os períodos a média anual foi similar (1.689 mm/ano na calibração e 1.681 mm/ano na validação), no entanto o desvio padrão do período de calibração foi de 324 mm e no de validação foi 521 mm. Além disso, o período de validação apresenta o ano mais seco da série histórica (1.135 mm em 2016,) a sequência de 3 anos mais seca (2016, 2017 e 2018) e o ano mais úmido da série (2.616 mm em 2020).

Os modelos foram capazes de simular a produção de sedimentos de modo adequado,

apresentando desempenho superior aos estudos analisados por Bressiani (2015) e aqueles obtidos por Mauri (2020) e Simões et al. (2021). A tendência de superestimar a produção de sedimento (valores negativos de PBIAS) também foi observada na análise de Bressiani (2015) e de Mauri (2020). Esse comportamento se torna mais pronunciado no período da validação, possivelmente agravado pela modificação do perfil de chuvas nesse período em comparação com o período da calibração (conforme discutido para a simulação de vazões).

As simulações com o SWAT geralmente apresentam resultados melhores na simulação de vazões do que de sedimentos, muitas vezes devido à deficiência nos dados relacionados às medições de sedimentos e às imprecisões inerentes à adoção de uma curva-chave de descarga sólida (Bressiani, 2015; Simões et al., 2021).

É importante destacar que a avaliação do desempenho por meio de indicadores estatísticos considera apenas o comportamento da melhor simulação. Essa abordagem determinística é adotada pela grande maioria dos estudos apresentados, mas pode levar a conclusões equivocadas sobre a capacidade do modelo em representar adequadamente os diferentes processos físicos que ocorrem na bacia.

Abbaspour (2015) reforça que o processo de calibração não objetiva alcançar a melhor simulação e sim o melhor intervalo dos parâmetros do modelo, que conduz a uma faixa de 95PPU que

apresenta um balanço equilibrado entre altos valores de P-factor e baixos valores de R-factor, em uma abordagem de caráter estocástico.

Em ambas as abordagens (determinística e estocástica) os modelos construídos apresentaram resultados adequados para a maioria dos indicadores, com exceção do PBIAS, conforme já exposto, indicando tendência a superestimar vazões e produção de sedimentos no período de validação.

Conforme evidenciado nos Gráficos 6 e 7, os métodos SSC e SMSC não apresentaram diferenças significativas de desempenho na simulação de vazões e sedimentos no ponto de jusante. No entanto, o Gráfico 8 demonstra que ambos os modelos superdimensionaram as vazões simuladas no ponto de montante, mas o método SMSC proporcionou uma melhor simulação de vazões que o SSC. Esse último fato era esperado, visto que no SMSC o processo de calibração objetivou definir parâmetros da bacia que minimizassem simultaneamente os erros em ambos os pontos (montante e jusante), enquanto o SSC considerou apenas o ponto de jusante. Desse modo, fica evidente que mesmo apresentando desempenhos similares em relação a vazões e sedimentos na saída da bacia hidrográfica, o método SMSC possibilita uma melhor representação dos processos hidrológicos que ocorrem no interior da bacia, conforme apontam Leta et al. (2017), Nkiaka (2018) e Song et al. (2021).

Gráfico 6 - Vazões simuladas com os métodos SMSC e SSC (jusante)

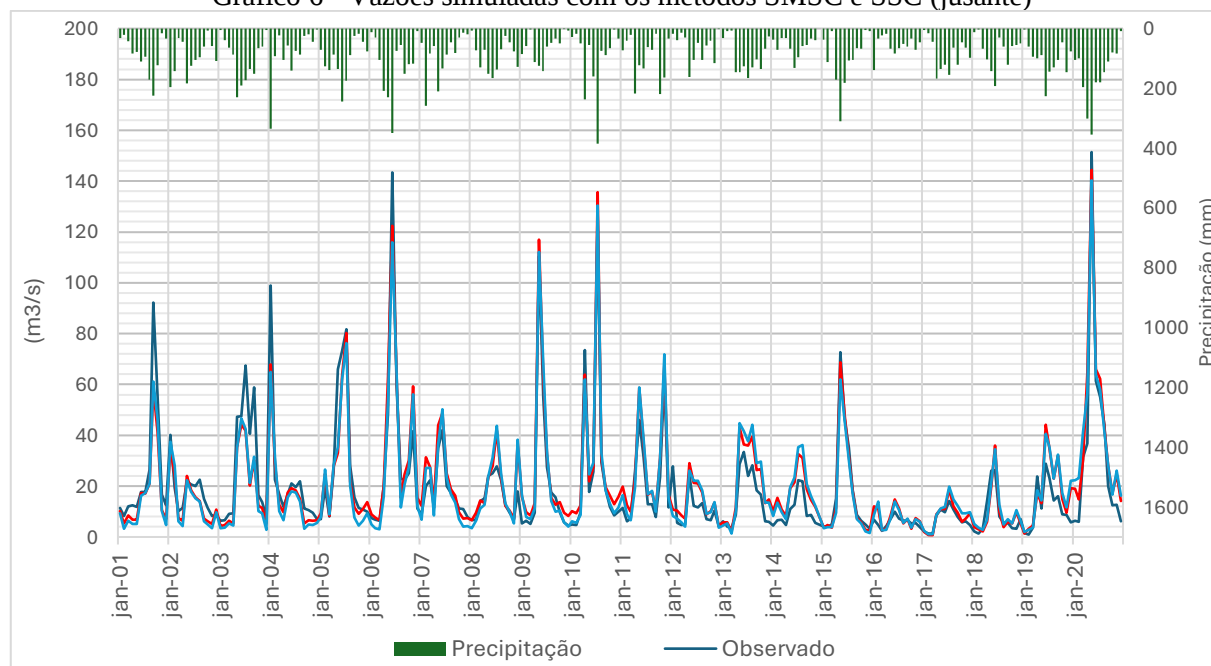


Gráfico 7 - Sedimentos simulados com os métodos SMSC e SSC (jusante)

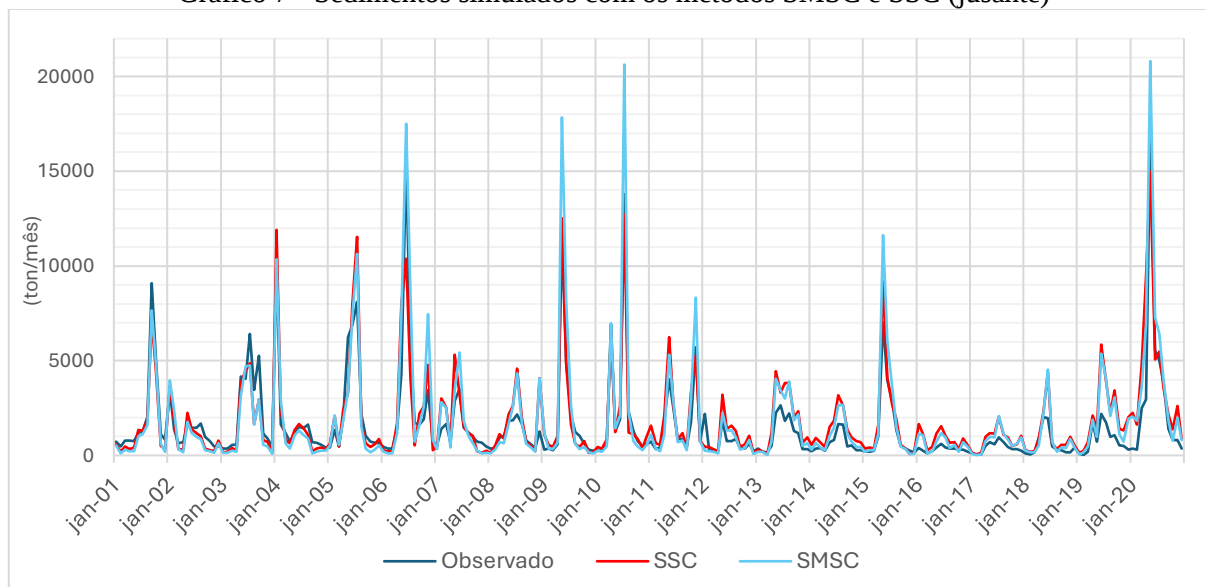
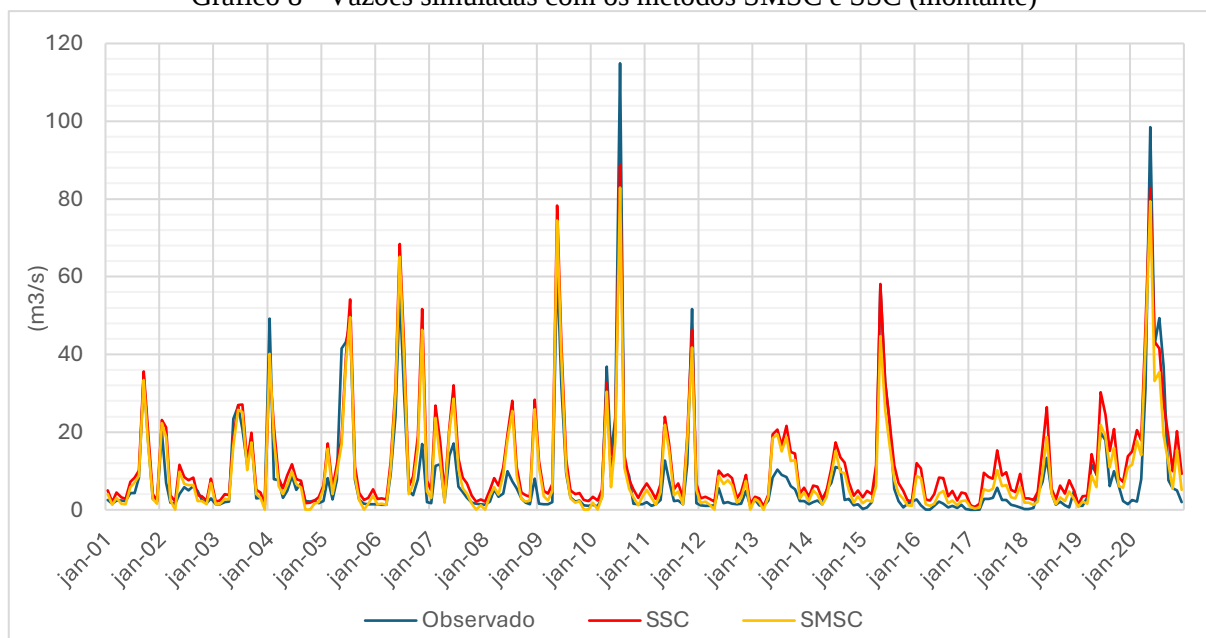


Gráfico 8 - Vazões simuladas com os métodos SMSC e SSC (montante)



Considerando todo o período de modelagem de vazões, o desempenho do modelo calibrado com o método SSC apresentou para o ponto de montante o valor de $NS = 0,78$ (bom) e $PBIAS = -44,90$ (insatisfatório), enquanto o SMSC apresentou $NS = 0,84$ (muito bom) e $PBIAS = -16,82$ (insatisfatório). Identifica-se em ambos os indicadores o desempenho do método SMSC superior ao do SSC, conforme esperado.

Quanto ao superdimensionamento das vazões simuladas no ponto de montante, identifica-se um erro comum aos dois métodos de calibração,

em maior grau com a utilização do método SSC. É necessário, portanto, levantar algumas hipóteses para explicar esse fenômeno.

A primeira é que as retiradas de água realizadas por usuários na bacia ocorram em uma escala que reduza substancialmente as vazões medidas, afastando-as do que seriam as vazões naturais da bacia. Essa hipótese parece remota quando se avalia os dados de demandas outorgadas apresentadas por Inema (2018), que não parecem substanciais a ponto de ocasionar esse fenômeno, mas deve-se considerar que é usual que ocorram

captações não outorgadas.

A segunda hipótese é que a existência de reservatórios não cadastrados possa ocasionar o represamento de escoamento superficial e a consequente redução das vazões de pico observadas nas estações fluviométricas. Isso poderia explicar em parte as diferenças entre as vazões observadas e simuladas, em especial nos eventos de cheias intermediárias.

A terceira hipótese remete à simplificação de processos hidrológicos inerente à modelagem e à calibração. Alguns parâmetros que regem fluxos importantes como a interação entre as águas superficiais e subterrâneas são definidos de modo homogêneo para toda a área modelada, o que evidentemente conflita com a natureza espacialmente heterogênea da bacia do rio Pojuca. Além disso, todos os parâmetros são considerados temporalmente constantes, o que também não reflete precisamente a realidade. De fato, Embasa (2023) demonstrou com base em medições automáticas de vazão realizadas em dois pontos do

rio Pojuca entre 2021 e 2022, que o rio apresentou um comportamento efluente (recebeu água do aquífero) em 6 meses e influente (perdeu água para o aquífero) nos outros 6 meses, este último vetor ocorrendo mais fortemente nos meses de maio/21 e março/22. Dessa forma, o comportamento influente do rio observado em metades dos meses do ano, não considerado no processo de modelagem, pode contribuir com o superdimensionamento das vazões simuladas.

Conforme exposto, o modelo calibrado com o método SMSC obteve vazões simuladas mais próximas daquelas observadas na estação fluviométrica BA-06 em comparação com o método SSC e ambos apresentaram resultados similares para o ponto de jusante. Desse modo, optou-se por utilizar o modelo calibrado pelo método SMSC para realizar as simulações dos cenários de cobertura e uso da terra. A Tabela 2 apresenta os intervalos de parâmetros resultantes do processo de calibração de vazão e sedimentos com o método SMSC.

Tabela 2 - Intervalos obtidos pela calibração de vazão e sedimentos (SMSC)

Processo	Parâmetro	Limite inferior	Limite Superior	Melhor valor
Água Subterrânea	ALPHA_BF	0,550	0,693	0,645
	GW_DELAY	114,319	202,334	148,909
	GW_REVAP	0,149	0,200	0,197
	GWQMN	3.896,315	5.599,344	5.073,108
	REVAPMN	206,170	480,214	279,340
	DEEPST	2.960,613	4.703,503	4.328,782
	RCHRG_DP	0,040	0,000	0,169
Escoamento Superficial	CN2	-0,320358	0,039158	-0,230839
	SLSUBBSN	-0,253	0,241	0,105
	SURLAG	5,859	10,692	7,942
Evapotranspiração	CANMX	18,769	39,545	35,494
	EPCO	0,010	0,572	0,392
	ESCO	0,566	0,698	0,697
Água no solo	SOL_AWC	0,214	0,703	0,321
	SOL_K	-1,000	-0,420	-0,572
Fluxo de água no canal	CH_K2	135,573	200,000	157,285
Erosão	LAT_SED	10,561	16,562	12,583
	USLE_K	-0,858	-0,577	-0,777831
	USLE_P	-0,944	-0,559	-0,918
	ADJ_PKR	1,895	1,965	1,933

	SPEXP	1,266	1,632	1,423
Fluxo de	SPCON	0,000	0,003	0,001
sedimento no	PRF_BSN	0,664	1,143	0,879
canal	CH_COV2	0,743	0,968	0,764
	CH_COV1	0,598	0,721	0,649

Simulações dos cenários de cobertura e uso da terra

As componentes hidrológicas e principais resultados da simulação de cada cenário são apresentados na Tabela 3. Na Tabela 4 os resultados de cada cenário são comparados com os resultados do Cenário Base, que corresponde à cobertura da terra existente em 2020

O cenário Reflorestamento Total apresentou elevações nas vazões média (15%) e mensal com 90% de permanência (11%), bem como no escoamento subterrâneo (18%) e na recarga para o aquífero (17%). Por outro lado, no cenário Desmatamento Total ocorreu um efeito inverso, com reduções nas mesmas variáveis. A evapotranspiração variou somente no cenário Reflorestamento Total, com redução de 10%.

Identifica-se, dessa forma, que as

simulações indicam que o reflorestamento da bacia hidrográfica contribuiria com o aumento das vazões de base, o que significaria um contexto com maior segurança hídrica para o atendimento às múltiplas demandas por água superficial.

Dada a importância crescente do sistema aquífero Marizal/São Sebastião, presente em grande parte da bacia hidrográfica do rio Pojuca, para o abastecimento público e para o suprimento das demandas de atividades produtivas, a ampliação da recarga subterrânea proporcionada pelo reflorestamento seria um fator de relevância estratégica para o desenvolvimento socioeconômico regional com sustentabilidade hídrica a longo prazo. Martins et al. (2021) ao simularem um cenário similar de conversão plena de pastagens em floresta, também observaram o aumento na recarga subterrânea.

Tabela 3 - Resultados da simulação dos cenários (valores absolutos)

	Cenário Base (2020)	APP 100 metros	Desmatamento Total	Reflorestamento Total	Tendencial (2055)
Vazão média (m3/s)	23,06	23,61	21,83	26,55	23,44
Vazão mensal com 90% de permanência (m3/s)	4,57	4,63	4,29	5,10	4,72
Escoamento superficial (mm/ano)	20,14	18,89	20,55	20,31	25,21
Escoamento subterrâneo (mm/ano)	127,90	134,58	120,73	151,20	127,60
Recarga para o aquífero profundo (mm/ano)	13,82	14,11	13,13	16,12	13,52
Curva Número (CN)	42,19	41,20	42,94	37,53	42,64
Sedimentos (ton/ano)	2.350,19	2.422,99	2.243,12	2.840,17	2.428,13
Evapotranspiração (mm/ano)	667,30	658,60	683,80	599,90	671,90

Tabela 4 - Resultados da simulação dos cenários (percentuais)

	Cenário Base (2020)	APP 100 metros	Desmatamento Total	Reflorestamento Total	Tendencial (2055)
Vazão média	100%	102%	95%	115%	102%

Vazão mensal com 90% de permanência	100%	101%	94%	111%	103%
Escoamento superficial	100%	94%	102%	101%	125%
Escoamento subterrâneo	100%	105%	94%	118%	100%
Recarga para o aquífero profundo	100%	102%	95%	117%	98%
Curva Número	100%	98%	102%	89%	101%
Sedimentos	100%	103%	95%	121%	103%
Evapotranspiração	100%	99%	102%	90%	101%

Outro ponto relevante foi o substancial aumento do escoamento superficial (25%) no cenário Tendencial. Esse fato é condizente com a natureza dos processos de mudança na cobertura e uso da terra identificados na bacia, onde se observa um intenso processo de espalhamento das áreas urbanas, que notadamente favorecem a impermeabilização do solo, a redução da infiltração e o consequente aumento do escoamento superficial.

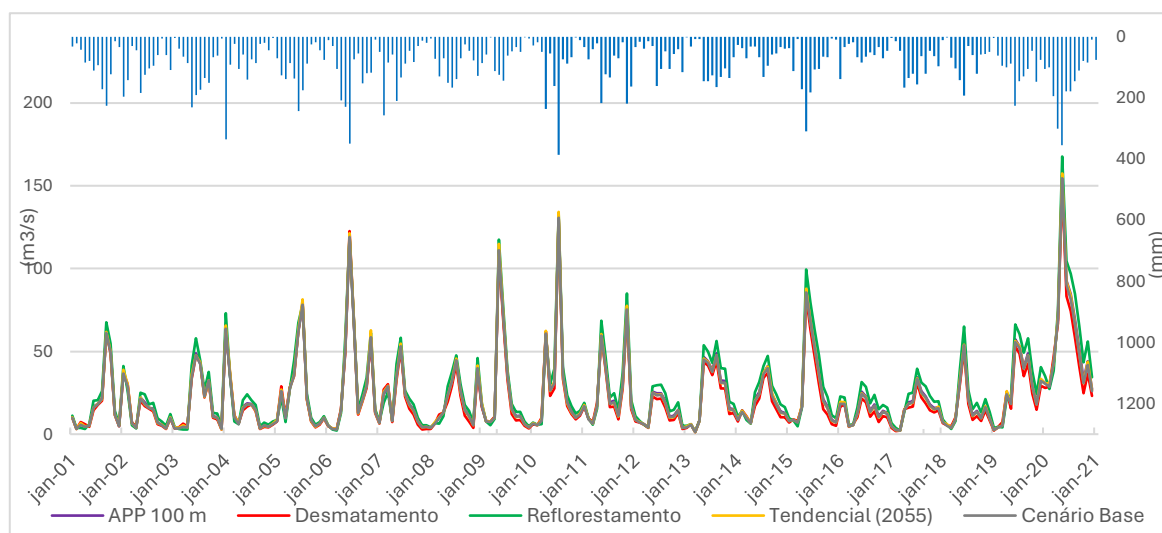
O valor do coeficiente CN variou de modo relevante apenas no cenário de “Reflorestamento total”, indicando que as alterações na cobertura e uso da terra nos outros cenários em comparação com o “Cenário Base” se deram em menor escala, condizente com os percentuais indicados na Tabela 2. Os valores de CN encontrados são considerados baixos, mas adequados a uma bacia hidrográfica predominante rural, com predomínio de pastagens e florestas (Santos e Lollo, 2016), em que a área urbana corresponde a menos de 4% da área total. Esses valores indicam uma alta capacidade de infiltração da água no solo e um baixo nível de escoamento superficial em relação ao volume precipitado.

A produção média mensal de sedimentos entregue pela bacia em seu exutório variou de modo similar às vazões médias. Essa produção equivale a cerca de $5 \text{ t.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, que é considerada baixa por Carvalho et al. (2000). Importante ressaltar que esse valor pode estar subdimensionado já que a curva-chave de descarga sólida utilizada para a calibração do modelo foi

construída a partir de dados de sólidos em suspensão do monitoramento realizado pela EMBASA, que não tinha como objetivo a medição da descarga sólida do rio. Esse monitoramento feito a partir de coletas nas margens do rio pode ter ignorado frações relevantes dos sedimentos totais, em especial aquelas que fluem nos estratos mais profundos da coluna d’água. Esse possível subdimensionamento dos valores de sedimentos totais observados pode ter forçado o processo de calibração a minorar os parâmetros da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) e, por conseguinte, reduzir o efeito das alterações na cobertura e uso da terra na produção de sedimentos. De fato, o processo de calibração SMSC reduziu os valores iniciais dos parâmetros da “USLE_K” e “USLE_P” em 78% e 92% respectivamente.

O Gráfico 9 demonstra que as vazões simuladas para o exutório da bacia em todos os cenários foram bastante próximas entre si durante todo o período em termos de magnitude e sazonalidade. Em alguns períodos é possível observar pequenas variações entre os cenários, em especial em situações de cheias moderadas. Nessas ocasiões o cenário “Reflorestamento total” apresentou as maiores vazões médias mensais e o “Desmatamento Total” as menores. Essa diferença se mostrou mais acentuada nos meses chuvosos (entre abril e agosto) no período entre 2012 e 2019, que foi marcado por uma estiagem prolongada ocorrida em diversas regiões do estado da Bahia, incluindo a bacia hidrográfica do rio Pojuca.

Gráfico 9 - Vazões simuladas em cinco diferentes cenários



Conclusões

O modelo SWAT apresenta, em ambos os métodos de calibração, um excelente desempenho para simular vazões mensais no ponto localizado próximo ao exutório da bacia, com cinco indicadores de um total de seis classificados como “muito bom” ou “bom”. No ponto a montante, foi observada a tendência de superestimar as vazões em ambos os métodos, mas o SMSC apresentou um desempenho superior ao SSC, conforme esperado, comprovando a importância da utilização do maior número possível de estações fluviométricas para a calibração do SWAT - em especial em bacias heterogêneas.

A bacia hidrográfica do rio Pojuca apresenta um comportamento hidrológico relativamente estável na comparação entre os cenários simulados. O cenário correspondente ao reflorestamento total da bacia é aquele que demonstra as maiores variações em relação ao cenário base. Esse cenário resulta em variáveis hidrológicas mais compatíveis com um contexto de segurança hídrica, visto que apresenta crescimento de 15% nas vazões médias, 11% nas vazões mínimas, 18% no escoamento de base e 17% na recarga para o aquífero profundo.

A recarga para o aquífero é relevante na bacia do rio Pojuca, visto que ela se situa sobreposta ao Sistema Aquífero Marizal/São Sebastião, um dos mananciais subterrâneos mais

importantes do estado da Bahia. Destaca-se também que o cenário tendencial apresenta a maior variação de uma componente hidrológica em relação ao cenário base (25% de aumento no escoamento superficial), fato compatível com a tendência de aumento da impermeabilização do solo decorrente do processo de antropização na bacia.

A modelagem hidrológica com o SWAT é eficaz para simulação dos efeitos na produção de água e sedimentos decorrentes das mudanças da cobertura e uso da terra na bacia hidrográfica do rio Pojuca, sejam elas tendenciais ou induzidas pela adoção de políticas públicas. Desse modo, tomadores de decisão podem utilizar o referido modelo hidrológico como ferramenta auxiliar na implementação de ações com foco na conservação dos recursos hídricos.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pela concessão de auxílio financeiro via Projeto Universal, - Processo n. 409304/2021-2, à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) pelo fomento e apoio ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (Profágua), à Universidade Federal da Bahia (UFBA), à Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB) e à Empresa Baiana de Águas e Saneamento (EMBASA).

Referências

Abbas, S. A., Bailey, R. T., White, J.T., Arnold, J. G., White, M. J., (2024). Quantifying the Role of Calibration Strategies on Surface-Subsurface Hydrologic Model Performance.

Hydrological Processes. 38. 1-27. 10.1002/hyp.15298.

Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S.A., Srinivasan, R., Yang, H., & Klove, B. (2015). A continental-scale hydrology and

water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology* (Vol. 524, pp.733-752).

- Aloui, S., Mazzoni, A., Elomri, A., Aouissi, J., Boufekane, A., & Zghibi, A. (2023). A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions, *Journal of Environmental Management* (Vol. 326).
- BAHIA. Governo do Estado. Secretaria de Infraestrutura. Superintendência de Recursos Hídricos. (2004). Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH. Relatório Final da Etapa 1. Diagnóstico e Regionalização. Salvador/BA.
- Back, Á. J., Souza, G.S., Galatto, S.L., Mazurana, M. (2024). Erosivity index based on climatological norms from 1991 to 2020 for the state of Rio Grande do Sul. *RBRH*. 29. 10.1590/2318-0331.292420230135.
- Bressiani, D.A., Gassman, P.W., Fernandes, J.G., Garbossa, L.H.P., Srinivasan, R., Bonumá, N.B., & Mediondo, E.M. (2015). Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering* (Vol. 8 (3), pp. 9 – 35).
- Carvalho, N.O. Filizola, J.R., Santos. P.M., & Lima, J.E.F.W. (2020). Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. ANEEL. Brasília/DF.
- CRA. Centro de Recursos Ambientais. Governo do Estado da Bahia. (2005). Relatório de Monitoramento das Águas do Estuário do Rio Pojuca. Salvador/BA.
- Costa, R.C.A., Santos, R.M.B., Fernandes, L.F.S., Carvalho de Melo, M., Valera, C.A., Valle Junior, R.F.d., Silva, M.M.A.P.d.M., Pacheco, F.A.L., & Pissarra, T.C.T. (2023). Hydrologic Response to Land Use and Land Cover Change Scenarios: An Example from the Paraopeba River Basin Based on the SWAT Model. *Water* (Vol. 15, n. 1451).
- Demissie, T.A. (2022). Land use and land cover change dynamics and its impact on watershed hydrological parameters: the case of Awetu watershed, Ethiopia. *J. Sediment. Environ.* (Vol. 7, pp. 79–94).
- EMBASA. Empresa Baiana de Águas e Saneamento. (2023). Estudo Hidrogeológico da Borda Leste da Bacia do Recôncavo, Fase 2 – Produto 5 (Relatório Final). Cooperação Técnica IICA/ABC/Embasa. Salvador/BA.
- Eshetie, A.A., Wubneh, M.A., Kiflew, M.S., & Alemu, M.G. (2023). Application of artificial neural network (ANN) for investigation of the impact of past and future land use–land cover change on streamflow in the Upper Gilgel Abay watershed, Abay Basin, Ethiopia. *Applied Water Science* (Vol. 13).
- Ferraz, L. L., Sousa, L. F., Silva, L. S., Silva, J. O., Tagliaferre, C., Santos, C. A. S., & Rocha, F. A. (2021). Calibration and validation of the SWAT model for hydrological simulation in a basin in Western Bahia. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais* (Vol. 12 (1), pp. 276-285)
- França, B. T., Andrade, M. P., Ribeiro, C. B. M., & Hippert, H. S. (2021). Dinâmica do uso do solo e alterações na vazão na bacia do Rio São Francisco no início do Séc. XXI. *Revista de Gestão de Água da América Latina* (Vol 18). Porto Alegre/RS.
- Franco, A.C.L., Oliveira, D.Y.D., & Bonuma, N.B. (2020). Comparison of single-site, multisite and multi-variable SWAT calibration strategies. *Hydrol. Sci. J.* (Vol. 65 (14), pp. 2376–2389).
- Gassman, F.W., Sadeghi, A.M., & Srinivasan, R. (2014). Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. *Journal of Environmental Quality* (Vol. 43, pp. 1–8).
- Gelete, G., Nourani, V., Gökçekuş, H., Gichamo, T. (2023). Physical and artificial intelligence-based hybrid models for rainfall-runoff-sediment process modelling. *Hydrological Sciences Journal*. 68. 10.1080/02626667.2023.2241850.

- Harifidy R.Z., Hiroshi, I., Kazuyoshi, S., Jun, M., Harivelo, R.Z.M., & Fernández-Palomino, C.A. (2024). Multi-gauge calibration comparison for simulating streamflow across the Major River Basins in Madagascar: SWAT p Toolbox, R-SWAT, and SWAT p Editor Hard calibration. *Hydrology Research* (Vol. 55, n. 3).
- Hossoda, D., Tercini, J., Garcia, J. (2024). Integrated modeling of quality and quantity for water resources management: case study in the Upper Paranapanema Basin. *RBRH*. 29. 10.1590/2318-0331.292420230140.
- INEMA. Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. (2018). Plano de ações estratégicas para gerenciamento dos recursos hídricos da bacia do Recôncavo Norte e Inhambupe. Salvador, 2018.
- Lepeška, T., Wojkowski, J., Wałęga, A., Młynski, D., Radecki-Pawlik, A., & Olah, B. (2020). Urbanization-Its hidden impact on water losses: Pradnik river Basin, Lesser Poland. *Water* (Vol 12, n. 1958).
- Leta, O.T., Griensven, A., & Bauwens, W. (2017). Effect of Single and Multisite Calibration Techniques on the Parameter Estimation, Performance, and Output of a SWAT Model of a Spatially Heterogeneous Catchment. *J. Hydrol. Eng.* (Vol. 22).
- Lopes, M. S., Tercini, J. R. B., Santi, A. D., Pedrozo, D. B., Boncarrère, J. I. G., Gonzalez, V. A. R., & Léo, E. C. (2021). Sistema de suporte a decisões aplicado ao gerenciamento de recursos hídricos: estudo de caso Bacias PCJ. *Rev. Gest. Amb. e Sust. – GeAS* (Vol. 10, p. 1-28).
- Makumbura, R.K., Gunathilake, M.B., Samarasinghe, J.T., Confesor, R., Mutti, L. N., & Rathnayake, U. (2022). Comparison of Calibration Approaches of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model in a Tropical Watershed. *Hydrology* (Vol. 9, pp. 1 - 21).
- MAPBIOMAS. Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. (2022). <https://mapbiomas.org/>.
- Martins, M.S.D.M., Valera, C.A., Zanata, M., Santos, R.M.B., Abdala, V.L., Pacheco, F.A.L., Fernandes, L.F.S., & Pissarra, T.C.T. (2021). Potential Impacts of Land Use Changes on Water Resources in a Tropical Headwater Catchment. *Water* (Vol. 13, n. 3249).
- Mauri, E.N.E, Viola, M.R., Norton, L.D., Owens, P.R., Mello, C.R., Pinto, L.C., & Curi, N. (2020). Hydrosedimentological modeling in a headwater basin in Southeast Brazil. *Rev Bras Cienc Solo* (Vol. 44).
- Medeiros, K.T.B., & Lucena, M.M.A. (2023). Gestão dos recursos hídricos: uma revisão sob a perspectiva dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. *Rev. Gestão & Sustentabilidade Ambiental* (Vol. 12, pp. 1-14).
- Menezes, D., & Marcuzzo, F. F. N. (2018). Traçado e ajuste de curva-chave de sedimentos utilizando dados disponíveis no HIDROWEB. Tutorial. CPRM-PA/GEHITE. Versão 1.0. Porto Alegre/RS.
- Meng., F., Liu, T., Wang, H., Luo, M., Duan, Y., & Bao, A. (2018). An Alternative Approach to Overcome the Limitation of HRUs in Analyzing Hydrological Processes Based on Land Use/Cover Change. *Water* (Vol. 10).
- Molina-Navarro, E., Sánchez-Gómez, A., Martínez-Pérez, S. (2024). Innovating on Hydrological Modelling Calibration Towards a Realistic Simulation of Climate Change Impacts on Water Resources. *Earth Systems and Environment*. 10.1007/s41748-024-00462-5.
- Moreira, L.L., Schwaback, D., & Rigo, D. Parâmetros pedológicos para estimativa de vazões em bacias hidrográficas. (2019). *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* (Vol. 14, pp. 78-84).
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in

watershed simulations. Transactions of the ASABE (Vol. 50, pp. 885-900).

Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., & Daggupat, I. P. (2015). Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. American Society of Agricultural and Biological Engineers (Vol. 58, pp. 1763-1785).

Muhury N., Apan A., & Maraseni T. (2024). Modelling Floodplain Vegetation Response to Climate Change, Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model Simulated LAI, Applying Different GCM's Future Climate Data and MODIS LAI Data. Remote sens (Vol. 16).

Neitsch, S., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., & Williams, J.R. (2011). Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute.

Nkiaka, E., Nawaz, N.R., & Lovett, J.C. (2018). Effect of single and multi-site calibration techniques on hydrological model performance, parameter estimation and predictive uncertainty: a case study in the Logone catchment, Lake Chad basin. Stoch Environ Res Risk Assess (Vol 32, pp. 1665-1682).

ONU. Organização das Nações Unidas. (2015). Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil_Amigo_Pesso_Idosa/Agenda2030.pdf.

Pádua, J.A., & Chambouleyron, R. (2019). Dossiê: rios e sociedades. Revista Brasileira de História. (Vol. 39). São Paulo/SP.

Sanchez-Gomez, A., Martínez-Pérez, S., Pérez-Chavero, F.M., & Molina-Navarro, E. (2022). Optimization of a SWAT model by incorporating geological information through calibration strategies. Optimization and Engineering (Vol. 23, pp. 2203–2233).

Santos, M.S., & Lollo, J.A. (2016). Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. Eng Sanit Ambient. (Vol. 21, n. 4).

Santos, C.A.S., Rocha, F.A., Ramos, T.B., Alves, L.M., Mateus, M., Oliveira, R.P., & Neves, R. (2019). Using a Hydrologic Model to Assess the Performance of Regional Climate Models in a Semi-Arid Watershed in Brazil. Water (Vol. 11, n. 170).

Schürmann, A.; Kleemann, J.; Fürst, C.; & Teucher, M. (2020). Assessing the relationship between land tenure issues and land cover changes around the Arabuko Sokoke Forest in Kenya. Land Use Policy (Vol. 95).

Silva, E. P. Minoti, R. T., Alves, C.M.A., Volken, N.J., Figueroa, F.E.V., (2024). Evaluation of collective water rights allocation scenarios using the WEAP simulation model in a region of water use conflicts: the case of Formoso River Basin – Tocantins state/Brazil. RBRH. 29. 10.1590/2318-0331.292420230092.

Silva, R.M., & Medeiros, I.C. (2014). Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT. GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology (Vol. 14, pp. 211–231).

Simões, K., Condé, R.C.C., Roig, H.R., & Cicerelli, R.E. (2021). Application of the SWAT hydrological model in flow and solid discharge simulation as a management tool of the Indaia River Basin, Alto São Francisco, Minas Gerais. Ambiente & Água (Vol. 16, n. 3).

Song, Y., Zhang, J., & Lai, Y. (2021). Influence of multisite calibration on streamflow estimation based on the hydrological model with CMADS inputs. Journal of Water and Climate Change (Vol. 12, n. 7).

Srinivas, G., & Gopal, M.N. (2017). Hydrological Modeling of Musi River Basin, India and Sensitive Parameterization of Stream Flow Using SWAT CUP. Journal of Hydrogeology & Hydrologic Engineering (Vol. 6).

Tola, B., & Deyassa, G. (2024). A modeling approach for evaluating and predicting the impacts of land use land cover changes on

groundwater recharge in Walga Watershed, Upper Omo Basin, Central Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies* (Vol. 51).

Tucci, C. E. M. (2005). *Modelos hidrológicos*. (2 ed). Editora da UFRGS. Porto Alegre/RS.

UNESCO. (2009). The United Nations World Water Assessment Programme: Integrate water resources management in action. <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/references/iwrm-in-action-unesconwwapunep-dhi-2009.pdf>

Von Sperlig, M. (2014). *Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios*. Volume 7. (2 ed.). Editora UFMG.

Zewde N. T., Mekuria A. D., Solomon A. T. & Yitea S. G. (2024). Predicting runoff and sediment yields using soil and water assessment tool (SWAT) model in the Jemma Subbasin of Upper Blue Nile, Central Ethiopia, *Environmental Challenges* (Vol. 14).