



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Transposição de Água entre Bacias: Contribuições e Aplicação do Modelo SWAT

Tássio Jordan Rodrigues Dantas da Silva¹, Laércio Leal dos Santos², Ricardo de Aragão³, Daniele de Almeida Carreiro⁴, William de Paiva⁵, Paulo da Costa Medeiros⁶, Marcia Ramos Luiz⁷

¹ Doutorando em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), CEP 58400-970, Campina Grande, Paraíba. tassiojordan@hotmail.com (autor correspondente). ² Dr. em Engenharia Civil, Professor Associado B (DE) do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental e Professor do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental - PPGCTA, Universidade Estadual da Paraíba, R. Juvêncio Arruda, s/n Bodocongó, CEP 58400-970, Campina Grande, Paraíba. (83) 3315-3333. laercioeng@yahoo.com.br. ³ Dr. em Engenharia, Pesquisador colaborador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e professor associado na Unidade Acadêmica de Engenharia Civil - UAEC, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, CEP 58429-900, Campina Grande - PB. ricardoaragao@yahoo.com. ⁴ Mestranda em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), CEP 58400-970, Campina Grande, Paraíba. danielalealmeida23@gmail.com. ⁵ Dr. em Engenharia Civil, Professor Associado do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental e Professor do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental - PPGCTA, Universidade Estadual da Paraíba, Juvêncio Arruda, s/n Bodocongó, CEP 58400-970, Campina Grande, Paraíba. (83) 3315-3333. w.paiva461@gmail.com. ⁶ Dr. em Recursos Naturais, Professor Associado II da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, CEP 58429-900, Campina Grande - PB. paulo.costa@professor.ufcg.edu.br. ⁷ Dr. em Engenharia Mecânica, Professora com Dedicação Exclusiva do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). R. Juvêncio Arruda, s/n Bodocongó, CEP 58400-970, Campina Grande, Paraíba. (83) 3315-3333. marciarluiz@servidor.uepb.edu.br.

Artigo recebido em 23/03/2023 e aceito em 28/05/2024

RESUMO

As bacias hidrográficas são importantes unidades para a gestão dos recursos hídricos, mas devido as ações antrópicas essas unidades estão sendo impactadas, seja pelas mudanças climáticas, alterações na cobertura da terra, processos erosivos e entre outros. A transferência de água entre bacias surge como uma das alternativas para minimizar os efeitos dessas perturbações, especialmente, quando se trata de déficit hídrico na bacia receptora. Dentre as técnicas disponíveis para permitir a análise dos impactos das ações humanas nas bacias hidrográficas estão os modelos hidrológicos, tais como o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) que está sendo utilizado para diversas finalidades, dentre elas, na análise de transposição de bacias. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar um levantamento literário sobre a temática da transposição de água entre bacias, abordando a aplicabilidade do modelo SWAT como ferramenta de suporte a decisão em estudos de simulação hidrológica quando a transferência de água entre bacias é considerada. Os resultados mostram que, apesar de pouco utilizado na avaliação dos impactos (positivos e negativos) causados pela transferência de água entre bacias, o modelo hidrológico SWAT demonstrou bom desempenho quando aplicado isoladamente nesse tipo de simulação, bem como quando acoplado a outro modelo.

Palavras-Chave: Modelagem Hidrológica. Recursos Hídricos. Bacia Hidrográfica. Transposição de bacias

Transfer of Water between watershed: Contributions and Application of the SWAT Model

ABSTRACT

Watershed are important units for the management of water resources, but due to human actions, these units are being impacted, whether by climate change, changes in land cover, erosion processes, among others. Water transfer between basins appears as one of the alternatives to minimize the effects of these disturbances, especially when it comes to water deficit in the receiving basin. Among the techniques available to allow the analysis of the impacts of human actions on river basins are hydrological models, such as the *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) model, which is being used for several purposes, among them, in the analysis of basin transposition. In this context, the present work aimed to carry out a literary survey on the topic of water transfer between basins, addressing the applicability of the SWAT model as a decision support tool in hydrological simulation studies when water transfer between basins is considered. The results show that, despite being little used in evaluating the impacts (positive and negative) caused by water transfer between basins, the SWAT model demonstrated good performance when applied alone in this type of simulation, as well as when coupled with other models.

Keywords: Hydrological Modeling. Water Resources. Watershed. Water Transfer

Introdução

Nas últimas décadas, as questões relacionadas à degradação da qualidade ambiental em bacias hidrográficas aumentaram expressivamente em todo o mundo, tornando-se uma das grandes preocupações ecológicas da sociedade (Wu & Chang, 2020; Shittu et al., 2021; Huang et al., 2022). O consumo excessivo de recursos naturais e a necessidade de um crescimento contínuo, somado a má gestão territorial, causaram uma série de danos ao planeta e seus ecossistemas (Niknamian, 2019), especialmente relacionada à disponibilidade dos recursos hídricos, em que a falta de infraestrutura adequada e a pressão antropogênica têm limitado a prestação de serviços hídricos de forma sustentável, especialmente em regiões áridas e semiáridas (Shittu et al., 2021).

Nesse contexto, a gestão integrada de recursos hídricos fornece uma sólida estrutura para os governos alinharem as formas de uso da água com as demandas necessárias de diferentes usuários. Assim, uma das alternativas que visa minimizar a escassez de recursos hídricos em uma determinada bacia hidrográfica devido aos longos períodos de estiagem ou mesmo a gestão limitada dos seus recursos existentes é a integração de bacias hidrográficas, restabelecendo segurança hídrica e o suprimento de necessidades relacionadas aos usos múltiplos da água na bacia receptora (Farias et al., 2023; Nascimento et al., 2023).

Sinha et al. (2020) expõe que a transposição de águas entre bacias pode ser um elemento decisivo em muitas regiões e contribui para atenuar a pressão sobre determinados mananciais e recursos. Entretanto, projetos de integração entre bacias envolve custos ambientais, resultantes das condições naturais e antrópicas da região, envolvendo perda de biodiversidade, fragmentação de vegetação nativa, risco de introdução de espécies exóticas e modificação do regime fluvial na bacia receptora (Woo et al., 2021; Silva et al., 2021a). Outro aspecto relacionado a esses projetos envolve a mudança hidrossedimentológica, pois sabe-se que essas interferências podem alterar a produção de sedimentos e água, diretamente no escoamento fluvial, modificando a geometria de canais, as quantidades de sedimentos transportados e a qualidade da água (Le Mesnil et al., 2020; Najafi et al., 2021).

Nesse sentido, os modelos hidrossedimentológicos aparecem como uma ferramenta que não apenas prevê e analisa cenários de perda de solo, mas também a geração de

sedimentos em uma bacia hidrográfica para auxiliar na avaliação dos impactos resultantes e propor alternativas de planejamento, o que contribui para uma gestão adequada nessas áreas (Serrão et al., 2022).

O SWAT, destaca-se entre os modelos hidrológicos, por ser mundialmente utilizado e por ser aplicado em bacias hidrográficas com o objetivo de avaliar aspectos quantitativos e qualitativos na produção e transporte de sedimentos e nutrientes, qualidade da água, fornecer informações técnicas, avaliar o comportamento do ciclo hidrológico da bacia, prever mudanças no uso e cobertura da terra e simular cenários futuros (Affessa et al., 2022; Serrão et al., 2022). Assim, possíveis interferências/impactos poderão ser identificadas quanto a hidrossedimentologia e qualidade das águas, contribuindo para o gerenciamento dos recursos hídricos e qualidade ambiental.

Mediante o exposto, este estudo tem como objetivo fornecer uma revisão de literatura atualizada sobre a transferência de água entre bacias hidrográficas, abordando impactos (positivos e negativos) causados por esta transferência, como também sobre a aplicação do modelo SWAT como ferramenta de apoio a decisão para análise do processo de integração entre bacias hidrográficas.

Metodologia

Para efetivação do trabalho foi realizado um levantamento bibliográfico de forma exploratória, com abordagem qualitativa, utilizando o método dedutivo, sendo a pesquisa literária alcançada por meio de plataformas digitais como o Portal Capes Periódicos, *Scientific Electronic Library Online* (SciELO) *SciVerse Scopus*, e *Google Scholar*. Como critério, priorizou-se o uso de artigos de revisão por pares publicados nos últimos cinco anos, leis, documentos oficiais/ governamentais e a literatura clássica.

Desenvolvimento

Bacia hidrográfica como unidade básica de estudos hidrológicos

Uma bacia hidrográfica constitui-se no conjunto de terras delimitadas pelos divisores de água e drenadas por um rio principal, seus afluentes e subafluentes (Tucci & Clarke, 1997), Wu e Chang (2020), complementam que, as bacias são

células naturais básicas para o pleno desempenho dos dispositivos ambientais, como espaços físicos para o estudo técnico-científico e cada vez mais estão sendo utilizadas como unidades para o gerenciamento ambiental.

Definir uma bacia hidrográfica como uma unidade de pesquisa está se tornando mais comum e é frequentemente usado em estudos relacionados à gestão e preservação do solo e da água, agricultura, silvicultura e na pesquisa ambiental (Alamanos et al., 2019). Assim, a bacia hidrográfica torna-se uma área ideal para planejamento integrado, manejo dos recursos naturais em um ambiente autodefinido, pois é considerada: a principal unidade fisiográfica da área relacionada ao escoamento das águas superficiais (Alamanos et al., 2019; Sorando et al., 2019).

A população mundial está a passar por um processo de urbanização devido a pressões demográficas e econômicas. De acordo com as Nações Unidas/Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais (2019), espera-se que a proporção da população mundial que vive em cidades aumente dos 53% atuais para 69% em 2050. Isto significa aumentar a concorrência pelo abastecimento de água urbana entre as cidades e indústrias localizadas na mesma bacia hidrográfica

(Possantti & Marques, 2019). Por exemplo, as conclusões de Flörke et al. (2018) sugerem que, até 2050, 41% dos setores consumidores de produção de alimentos nas 482 maiores cidades do mundo poderão estar em conflito com o abastecimento de água urbano. Portanto, a visão das bacias hidrográficas como sistemas produtores de água tem recebido cada vez mais atenção (Figura 1).

Vale destacar que as perturbações ambientais são dispersas e muitas vezes é preciso que a análise seja feita a nível de sub-bacias para que esses impactos no meio ambiente possam ser identificados com mais clareza. Segundo Marin et al. (2020), do ponto de vista hidrológico, a escala da microbacia é considerada a menor unidade da paisagem capaz de integrar todos os componentes relacionados com a disponibilidade e qualidade da água, por exemplo, atmosfera, flora, culturas, solo, rochas e massas de água. Esta subdivisão é frequentemente utilizada no planejamento e execução de programas de controle de erosão e conservação de água. Dadas as funções integradas dos elementos físicos, ambientais e sociais envolvidos nas bacias hidrográficas, elas se tornam uma unidade de planejamento e gestão ambiental fundamental, sendo um primeiro passo necessário para aplicar um modelo hidrológico (Marin et al., 2020; Affessa et al., 2022).

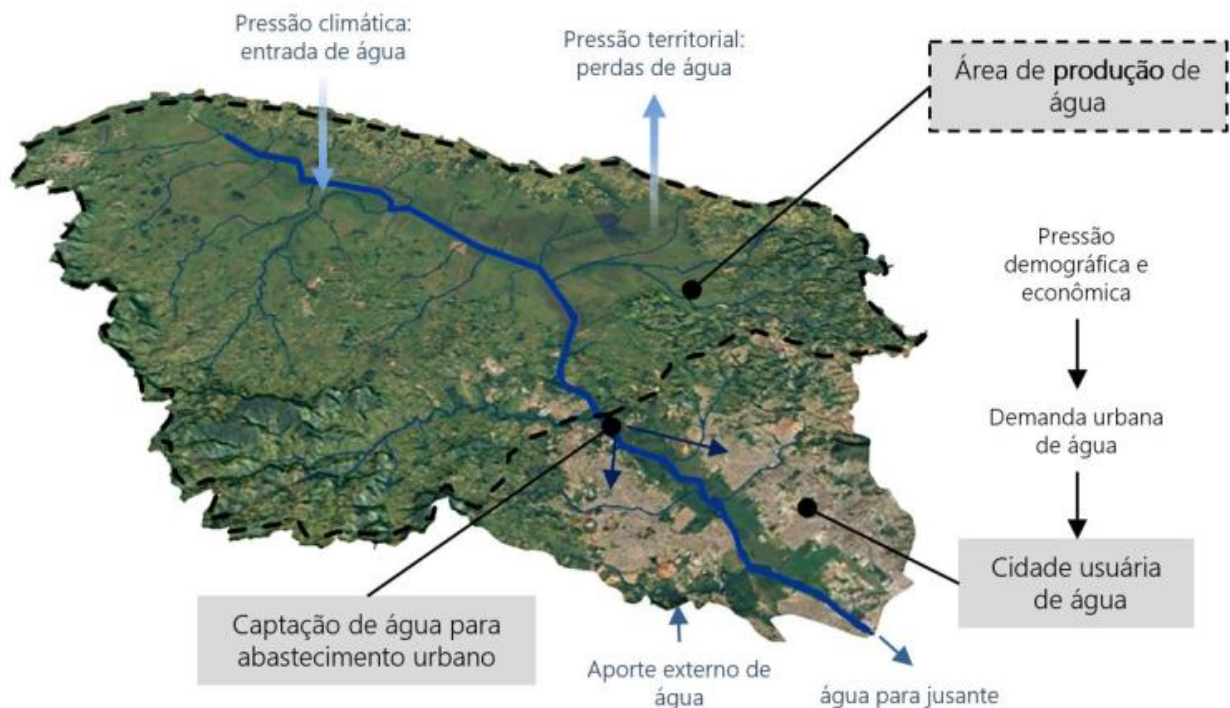


Figura 1. Representação das pressões de entrada e saída de água em uma bacia hidrográfica. Fonte: Possantti & Marques (2019).

Transposição de bacias hidrográficas

A integração de bacias hidrográficas, também conhecida como transposição de bacias hidrográficas, ilustra a intervenção de projetos de engenharia, que tem sido utilizada desde a antiguidade para atender às necessidades da população de centros urbanos aglomerados. À medida que as tecnologias utilizadas na engenharia hidráulica melhoraram, tornou-se possível a transferência de água entre áreas que antes era impossível devido à topografia (De Abreu & Nunes, 2022). Nesse contexto, a eletricidade tornou-se um insumo fundamental na expansão do sistema de distribuição de água mundial. A recorrente intensificação do estresse hídrico nas regiões áridas e semiáridas, bem como nas áreas metropolitanas, tornou-se um argumento frequentemente levantado para justificar a implementação da integração de bacias visando melhorar o abastecimento de água nessas regiões (De Moraes et al., 2020).

Estima-se que mais de 500 sistemas de transposição de água em grande escala tenham sido instalados nos últimos 50 anos em vários países. Os Estados Unidos, Israel, Canadá, Austrália e África do Sul são exemplos de países que implementam projetos de desvio de água em larga escala para atender às crescentes demandas para irrigação, uso doméstico e industrial (De Moraes et al., 2020; Lima, 2020). As intervenções visam mover a água de bacias hidrológicas com excesso de água, onde a oferta de água excede a demanda, para bacias que já são escassas ou onde o crescimento da demanda provavelmente causará isso em um futuro próximo (De Abreu & Nunes, 2022). Em muitos casos, as bacias receptoras estão localizadas em regiões semiáridas, onde a baixa pluviosidade leva à redução do abastecimento de água, enquanto as bacias doadoras apresentam uma realidade oposta (De Medeiros et al., 2022).

No Brasil, essa realidade pode ser observada entre a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF) e as Bacias Hidrográficas do

Semiárido Setentrional (BHSS). Enquanto na BHRSF a precipitação anual oscila entre 1200 e 2300 mm, distribuídos por uma bacia hidrográfica de 639000 km², ao longo de sete estados brasileiros com uma população de mais de 16 milhões, nas BHSS, a precipitação média anual não ultrapassa os 650 mm, porém a população é de 26 milhões de habitantes (Salinas et al., 2019; Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional [MIDR], 2022). Devido a essa característica de baixos índices pluviométricos, combinados com condições de seca recorrentes, acabam impossibilitando as demandas hídricas dessa região do país (De Medeiros et al., 2022).

O Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF) tem por objetivo mitigar essa escassez hídrica, bem como promover a segurança hídrica para mais de 12 milhões de pessoas (MIDR, 2022). Esse projeto tem uma extensão de 480 km dividido em dois eixos principais, Eixo Norte e Eixo Leste (Figura 2), contemplando os estados da Paraíba, Rio Grande do Norte, Pernambuco e Ceará. A vazão outorgada é de 26,4 m³/s e contempla cinco grandes bacias hidrográficas: Jaguaribe, Piranhas-Açu, Paraíba, Apodi e Moxotó/ Terra Nova/ Brígida (MIDR, 2022).

O Eixo Norte do PISF, que tem início no município de Cabrobó/PE, em pleno funcionamento, terá uma vazão outorgada de 10 m³/s e irá transferir as águas do São Francisco através de 260 km de extensão, com oito aquedutos, três estações elevatórias, três tuneis e 15 reservatórios, contemplando 220 municípios com cerca de 6,5 milhões de habitantes (MIDR, 2022). Vale destacar que, assim como qualquer outro projeto de integração de bacias o PISF acarreta diversos impactos ambientais, somados aos altos custos e aos riscos de degradação ambiental. O funcionamento desse projeto é essencial para garantir a segurança hídrica do semiárido brasileiro (De Medeiros et al., 2022).



Figura 2. Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF). Fonte: MIDR (2022).

Impactos nas bacias hidrográficas

Mudanças no uso e cobertura da terra

A busca pelo uso racional da terra tenta equacionar a necessidade de conservar os recursos naturais com a necessidade de produzir alimentos e energia (Wang et al., 2022). Este desafio visa disseminar conceitos e tecnologias de conservação e gestão voltadas para a redução dos impactos nos ecossistemas, principalmente quando se trata da reorganização e conservação das paisagens, o que inclui a proteção do solo, da água, do ar e de diversos outros componentes e organismos (Caballero et al., 2022; Wang et al., 2022).

À medida que as ações antrópicas sobre o meio ambiente se intensificam, observa-se um processo no qual outros usos da terra substituem a paisagem natural. Esses distúrbios na paisagem causam problemas ambientais ao converter extensas e contínuas áreas de cobertura florestal em fragmentos florestais, comprometendo as funções ambientais em termos de 'bens e serviços' fornecidos pelos ecossistemas naturais (Esfandeh et al., 2022).

Do ponto de vista hídrico, mudanças naturais e artificiais na cobertura vegetal da bacia afetam seu comportamento hidrológico. Essas mudanças têm os mais diversos impactos sobre o meio ambiente e a disponibilidade de recursos

hídricos. Assim, para descrever o principal impacto do uso da terra na hidrologia, estudos experimentais mostram claramente que há um aumento no escoamento médio com o desmatamento em pequenas bacias rurais (Ramos et al., 2024; Silva et al., 2024).

Remoção da mata ciliar

As zonas ribeirinhas, ou de mata ciliar formam ambientes de amortecimento naturais entre a terra circundante e os cursos de água, portanto, proteger e gerir áreas próximas de riachos e rios tem implicações importantes para a qualidade da água e biodiversidade (Vidon et al., 2019). Essas regiões são a interface entre os ecossistemas aquáticos e terrestres, conectando e ajudando a regular as funções ecológicas de ambos os sistemas (Ramos et al., 2024; Vidon et al., 2019). Desde que os seres humanos começaram a agricultura intensiva, as sociedades fizeram grandes mudanças na hidrologia de riachos e rios para criar condições para o cultivo, muitas vezes às custas das zonas ribeirinhas e de seus corpos d'água a jusante (Nascimento et al., 2023; Silva et al., 2024).

A proteção das zonas de mata ciliar, principalmente nos rios e mananciais é de extrema importância, pois evita a erosão dos solos adjacentes e evita ou reduz a sedimentação e assoreamento dos leitos dos rios. A derrubada da

vegetação das margens dos cursos d'água também é prejudicial, pois o material em suspensão pode interferir na qualidade da água dos corpos receptores (Graziano et al., 2022). Nas escalas de bacias hidrográficas e sub-bacias, a extensão e a condição das matas ciliares podem ser utilizadas como indicadores hidrológicos da sustentabilidade das atividades humanas (Vidon et al., 2019), pois as matas ciliares respondem por grande parte do estado ambiental de ecossistemas aquáticos (Graziano et al., 2022).

Nesse âmbito, a mata ciliar desempenha as mais diversas funções ambientais, entre as quais: funciona como corredor ecológico para a fauna; intercepta a precipitação, principalmente em níveis mais altos, e reduz os processos erosivos; atua como um "filtro ecológico", retendo sedimentos e nutrientes, está envolvida na manutenção da qualidade dos corpos d'água; absorve a radiação solar, contribui para a estabilidade térmica da área. Entre outras, essas zonas desempenham um papel direto na estabilidade das microbacias hidrográfica, exercendo funções hidrológicas fundamentais para manter a quantidade e a qualidade da água, bem como do próprio ecossistema como um todo (Burdon et al., 2020).

Uma característica distintiva da mata ciliar é sua alta rugosidade hidráulica e resistência ao fluxo, o que ajuda a reduzir a energia cinética das inundações. Esses efeitos dissipativos variam

durante as cheias de acordo com o escoamento e a largura da mata ciliar. Esse tipo de vegetação atua diretamente na redução dos picos de inundação e na estabilização das bordas e encostas, diminuindo a energia durante o escoamento superficial, e suas raízes atuam na estabilização do solo e na melhora da infiltração da água (Cole et al., 2020).

Vale ressaltar que no Brasil, por lei, a mata ciliar é utilizada como área de proteção permanente - APP, o que está legalmente regulamentado no art. 3. Parágrafo II da Lei nº 12.651/2012 (Lei nº 12651, 2012) "O Novo Código Florestal Brasileiro", que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, assim definida:

Área de Preservação Permanente - APP: área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas.

Pela nova lei florestal, a proteção de APPs ao longo dos corpos d'água varia de 30 a 500 metros, dependendo da largura do curso d'água (Tabela 1).

Tabela 1. Faixa mínima de vegetação a ser protegida às margens dos rios

DELIMITAÇÃO DAS FAIXAS MARGINAIS DE CURSOS D'ÁGUA	
LARGURA DO RIO (m)	LARGURA MÍNIMA DA APP (m)
< 10	30
Entre 10 e 50	50
Entre 50 e 200	100
Entre 200 e 600	200
> 600	500

Fonte: Lei nº 12651 (2012)

Erosão do solo

Entre os recursos naturais da Terra, o solo é visto como de extrema importância, em razão de ser essencial, direta ou indiretamente, fonte para a alimentação humana e sustentação de toda vida no planeta (Silva et al., 2024). Além de servir para diversas finalidades, como no ramo da construção civil. No entanto, é evidente que, ao passar dos anos, esse recurso natural gradualmente vem sofrendo modificações, seja pela ação antrópica ou

natural, o que acarreta seu esgotamento, e consequentemente, a sua degradação (Ebabu et al., 2022).

Um dos fatores pontuais que promove essa degradação é o processo de erosão do solo. Este processo é considerado o agente geológico transformador da crosta terrestre, sob a ação de fatores erosivos que deterioram e transportam o material particulado do solo (Sartorio & Maier, 2024).

A erosão é tão antiga quanto o planeta Terra, sendo geológica e procedente de fenômenos naturais que agem constantemente na superfície terrestre, como eventualidade natural do processo de remodelação do relevo, e estabelecendo um processo positivo para a formação do próprio solo (Borrelli et al., 2021). A ação antrópica quebra essa harmonia, rompendo o equilíbrio natural desse processo, e dando origem a erosão acelerada (singularizada apenas como erosão), fenômeno que gera grandes prejuízos à sociedade (Milazzo et al., 2023), uma vez que grandes extensões de terra perdem a sua capacidade de produção. Existem três tipos de erosão hídrica: laminar, por sucros, e ravinas (voçorocas). Essas formas podem ou não aparecer no mesmo lugar ao mesmo tempo.

Ressalta-se, que a erosão acelerada ocasiona o empobrecimento do solo por meio da lavagem da camada superficial, transportando nutrientes, sedimentos, herbicidas e fertilizantes para os terrenos mais baixos (planícies), para o lençol freático por meio da percolação, ou aos corpos hídricos superficiais, o que provoca a contaminação das águas (Sartorio & Maier, 2024). O assoreamento dos corpos hídricos é outro problema causado pela erosão do solo, aumentando o risco de enchentes e interferindo na qualidade da água devido ao material lixiviado (Padulano et al., 2021; Lee et al., 2022).

Aumento na produção de sedimentos

Os processos de produção e deposição de sedimentos ao longo das bacias hidrográficas são fenômenos naturais, mas seus impactos são intensificados pela influência antrópica, por meio do desmatamento desordenado, construção civil, e atividades agropecuárias e mineradoras, sem padrões de conservacionismo (Malutta et al., 2020). Devido ao efeito erosivo da água sobre o solo da bacia hidrográfica, a grande quantidade de sedimentos transportada pela rede de drenagem leva à degradação do corpo hídrico e causa danos significativos à população, ao desenvolvimento socioeconômico e ao meio ambiente (Najafi et al., 2021; Silva et al., 2021b; Carreiro et al., 2022).

Vale destacar, que em várias etapas do processo, além do assoreamento de rios e reservatórios, ocorrem perdas ambientais que vão desde a erosão do solo que ocorre na fase de produção de sedimentos e o comprometimento da qualidade da água observada na fase de transporte, até problemáticas mais graves como promover enchentes e a redução da vida útil de mananciais, que ocorrem na fase de deposição (Malutta et al., 2020; Najafi et al., 2021; Silva et al., 2021a).

A variabilidade nas descargas de sólidos suspensos depende em grande parte da precipitação. O escoamento superficial devido a eventos de chuvas é distribuído ao longo da bacia, transportando grandes quantidades de sedimentos finos para o rio e aumentando a concentração de sólidos em suspensão. Por outro lado, eventos de chuvas com baixa intensidade raramente apresentam picos de altas concentrações de matéria em suspensão (Brewer et al., 2020).

Mudanças hidrossedimentológicas ao longo dos rios são conhecidas por afetar tanto as bacias hidrográficas, alterando a produção de água e sedimentos, quanto o fluxo direto, alterando a geometria do canal e o transporte de água e materiais (Borrelli et al., 2021). No entanto, o entendimento dessas alterações depende de um conhecimento detalhado das variáveis geológicas, climáticas, edáficas, hidráulicas e sedimentares que controlam esses processos (Borella et al., 2024).

Mudanças climáticas

As mudanças climáticas são um dos maiores desafios para o mundo nos tempos atuais. É definido como mudanças significativas nos valores médios dos elementos meteorológicos, como precipitação e temperatura, para os quais as médias foram calculadas durante um longo período (Borrelli et al., 2020; IPCC, 2022). As últimas décadas indicam que mudanças significativas no clima em nível global foram o resultado de atividades humanas intensificadas que alteraram a composição da atmosfera global.

A pesquisa sobre mudanças climáticas e recursos hídricos tem sido um tópico popular na comunidade científica devido aos sérios efeitos para com os seres humanos, na sociedade e no meio ambiente (Malhi et al., 2021; IPCC, 2022). Vale ressaltar que o ciclo hidrológico está diretamente relacionado com o clima, assim alterações climáticas significativas tendem a modificar o regime pluviométrico e provocar o aumento de eventos extremos como, por exemplo, as secas prolongadas e inundações (Konapala et al., 2021; Carreiro et al., 2022). Esses eventos impactam na oferta de água, perturbando o fornecimento dos recursos hídricos para todos.

Muitos estudos e investigações sobre os efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos foram publicados em diferentes relatórios e revistas científicas internacionais (Sauer et al., 2021; Konapala et al., 2021; Martinez-Villalobos & Neelin, 2023). Sauer et al., (2021) utilizando conjuntos de dados globais para bacias hidrográficas, investigaram a sensibilidade da precipitação diária extrema e do fluxo de água

(vazão) às mudanças na temperatura diária. Esses autores concluíram que apenas nos casos mais extremos, para bacias hidrográficas menores, os aumentos na precipitação a temperaturas mais elevadas correspondem a aumentos na vazão, o estudo também indica tendências de enchentes para

os grandes centros urbanos e secas mias presentes no interior. Como observa-se na Figura 3, que expõe a escala de precipitação e vazão com temperatura para o planisfério terrestre, com destaque para a região nordeste da América do Norte, Alemanha e sudeste da Austrália.

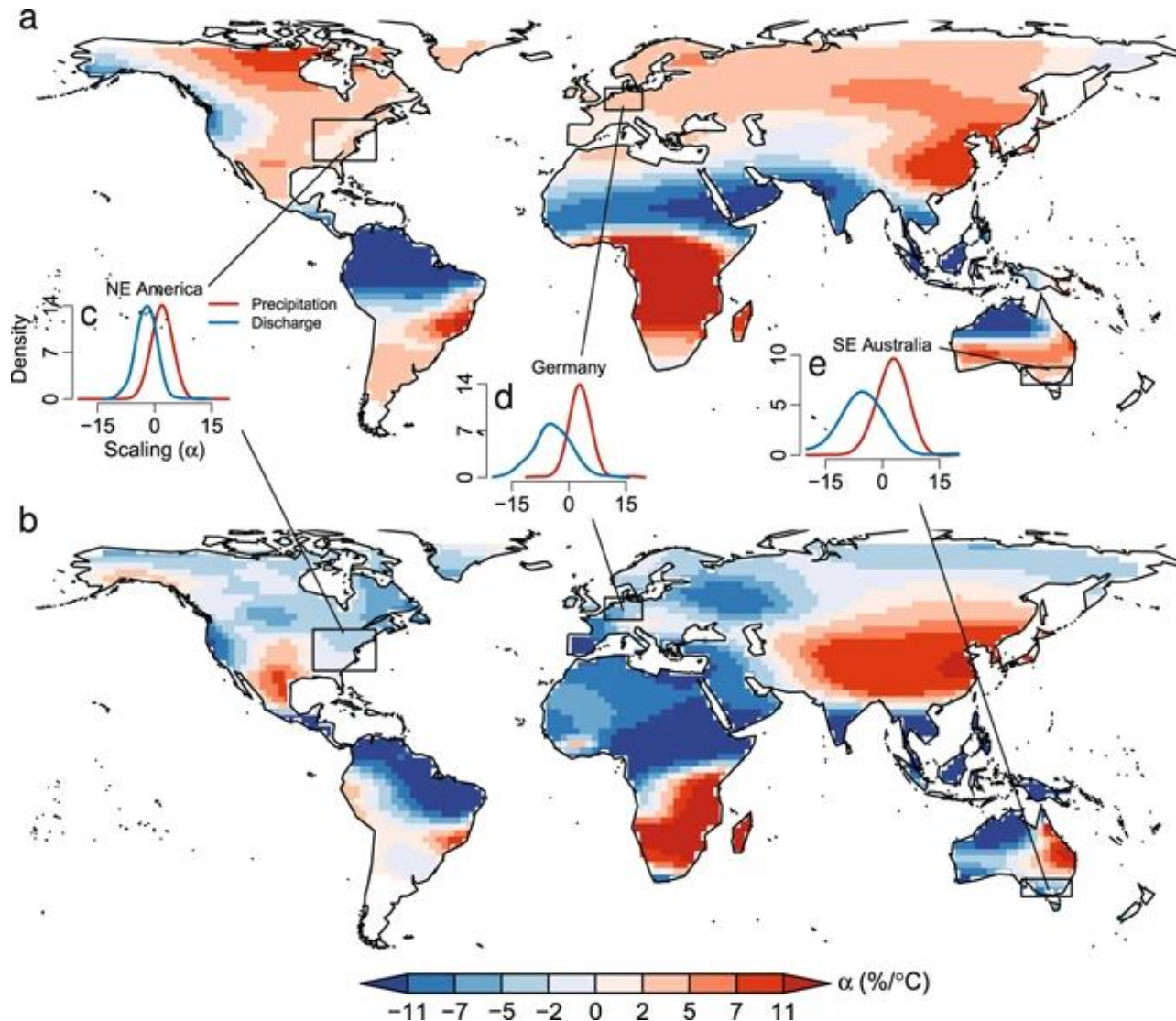


Figura 3. Escala de precipitação e vazão com temperatura para o globo terrestre. (a) Escala de precipitação. (b) Escala de vazão. (c) Densidade de probabilidade dos coeficientes de escala para o Nordeste da América do Norte. (d) Densidade de probabilidade dos coeficientes de escala para a Alemanha. (e) Densidade de probabilidade dos coeficientes de escala para o sudeste da Austrália. Fonte: Sauer et al., (2021).

Os estudos sobre a influência das mudanças climáticas no regime hidrológico tendem a se concentrar principalmente no continente europeu e norte-americano. A maioria aplica modelos hidrológicos orientados por cenários baseados em simulações de modelos climáticos (Malhi et al., 2021). Os avanços

metodológicos nos estudos de impacto das mudanças climáticas têm se concentrado em explorar os efeitos de diferentes formas de redução da escala do modelo climático para a escala da bacia hidrográfica, o uso de modelos climáticos regionais para criar cenários, as formas de aplicar cenários aos dados climáticos observados e o efeito

da incerteza do modelo hidrológico sobre os impactos estimados das mudanças climáticas. Em termos gerais, esses estudos mostraram que diferentes métodos de criação de cenários a partir da mesma fonte (um modelo climático em escala global) podem levar a diferenças substanciais no efeito estimado das mudanças climáticas (Borrelli et al., 2020; Konapala et al., 2021).

Ao que tange a transposição de bacias, os impactos sobre os recursos hídricos produzidos pelas mudanças climáticas podem ser agravados quando ocorrem em bacias hidrográficas que já apresentam baixos níveis de oferta hídrica (bacia receptora) e secas frequentes, e sujeitas a desequilíbrios entre demandas de água e recursos disponíveis (Malhi et al., 2021; Silva et al., 2022). No Brasil, de acordo com os cenários de mudança climática existentes, os recursos hídricos serão severamente afetados na região semiárida do país. No entanto, a detecção desses efeitos não é simples, porque a variabilidade natural do ciclo da água e os efeitos das captações de água nas vazões dificultam o estabelecimento de tendências claras (De Mello et al., 2020). Portanto, há uma necessidade de melhorar a avaliação dos impactos das mudanças climáticas usando modelos de simulação hidrológica.

Modelagem hidrológica

Quantificar e compreender o complexo ciclo hidrológico é difícil. Na determinação da precipitação, infiltração, escoamento superficial, evaporação e o escoamento em rios, muitos fatores precisam ser levados em conta e isso ocorre porque esses processos fazem parte do ciclo hidrológico (Herrera et al., 2022).

A compreensão desse ciclo em diferentes partições ambientais é crucial para a gestão de recursos hídricos e dimensionamento de projetos hidráulicos, mas devido à grande variabilidade e difícil quantificação desses fatores ambientais, além do tamanho das áreas que são analisadas essa tarefa torna-se insustentável (Moges et al., 2021). Diante disso, a modelagem hidrológica é utilizada como ferramenta básica para essas quantificações. Aplicando princípios de uma ou mais teorias e conceitos, um modelo hidrológico é capaz de reproduzir os processos do ciclo hidrossedimentológicos em uma escala de tempo especificada, estimando componentes previamente desconhecidos ou não quantificados do fluxo deste ciclo (Guo et al., 2021; Moges et al., 2021).

Um modelo é uma representação de algum objeto ou sistema de forma facilmente acessível e utilizável com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Quanto mais complexo o sistema, mais desafiador e necessário será o modelo, como, por exemplo, os modelos hidrológicos (Asgari et al., 2022). Esses modelos são uma das ferramentas desenvolvidas cientificamente para melhor compreender e representar o comportamento das bacias hidrográficas e prever condições diferentes das observadas a partir de cenários propostos. Porém, a modelagem hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia hidrográfica e dos processos envolvidos, o que levou ao desenvolvimento de muitos modelos. Eles variam de acordo com os dados utilizados, a discretização, a prioridade da representação do processo e os objetivos a serem alcançados (Figura 4). Vale destacar, que modelos não são objetivos em si, mas ferramentas para alcançá-los (Nascimento et al., 2023; Ramos et al., 2024).

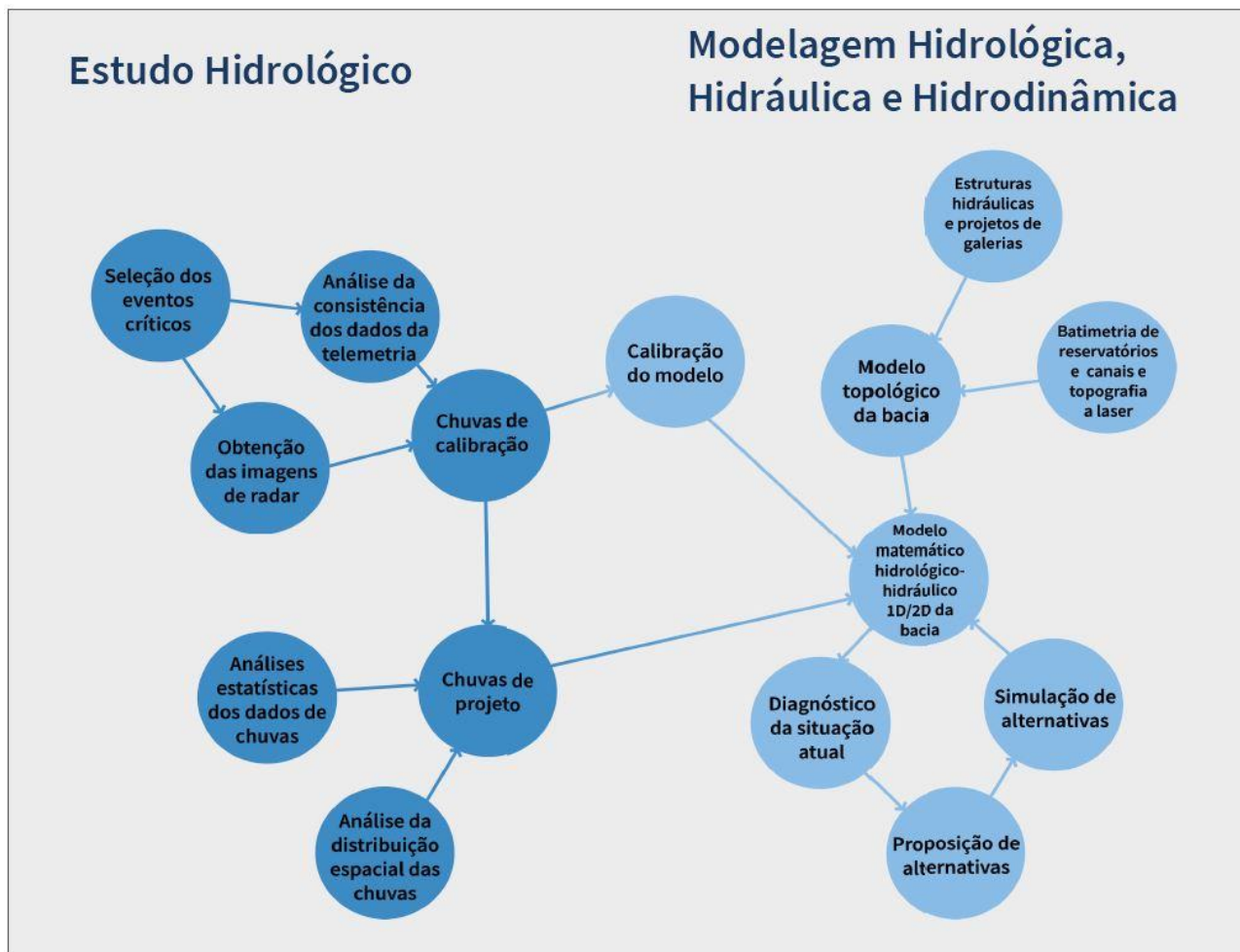


Figura 4. Estrutura para um modelo hidrológico. Fonte: Rossoni & Fan (2023)

Com o aumento do poder tecnológico, a utilização de modelos chuva vazão/de produção e transporte de sedimentos por meio de modelagem computacional tem aumentado nos últimos anos (Horton et al., 2022). Existem muitos modelos destinados a simular processos hidrossedimentológicos, variando em complexidade, escala de análise e requisitos de dados (Herrera et al., 2022).

Em geral, uma vantagem importante dos modelos hidrológicos é que vários cenários diferentes podem ser rapidamente investigados, muitos dos quais ainda não foram explorados em experimentos reais. Podem ainda ser mencionadas as vantagens associadas ao seu baixo custo, se compararmos o custo correspondente de uma investigação experimental (Farias et al., 2023; Asgari et al., 2022).

Os modelos podem ser empíricos ou baseados em processos com relação ao tipo de formulação envolvida. Quando utilizam relações baseadas em observações, essas relações geralmente são realizadas por funções estatísticas

que não levam em conta os processos físicos envolvidos, e sendo assim, esses modelos são chamados de modelos empíricos (Herrera et al., 2022).

Os modelos baseados em processos, por outro lado, são subdivididos em modelos físicos e modelos semi-conceituais, onde os físicos usam equações diferenciais para representar processos usando parâmetros que são determinados em uma base física, ou seja, podem ser medidos pela estimativa real dos parâmetros. Nos modelos semi-conceituais, os parâmetros utilizados são calibráveis, embora sejam aplicadas formulações para a descrição física do processo (Horton et al., 2022). Segundo Asgari et al. (2022) quando se trata de modelagem hidrossedimentológica, modelos de base física ganham destaque porque as equações representam os processos físicos envolvidos no evento. Ademais, com a valoração da informação espacial, o Sistema de Informação Geográfica (SIG) vem se destacando dentro da modelagem hidrológica e auxiliando na interface de programas e modelos.

Sistema de Informação Geográfica – SIG

O SIG é uma ampla ferramenta de pesquisa considerada pelo geoprocessamento para abranger as mais diversas áreas, permitindo utilizar técnicas de manipulação e processamento de dados geográficos (Abid et al., 2022). Chan et al. (2022)

definem SIG como uma integração de dispositivos, programas, dados, métodos e usuários capazes de armazenar, processar e analisar dados georreferenciados e gerar informações a partir de suas aplicações (Figura 5).

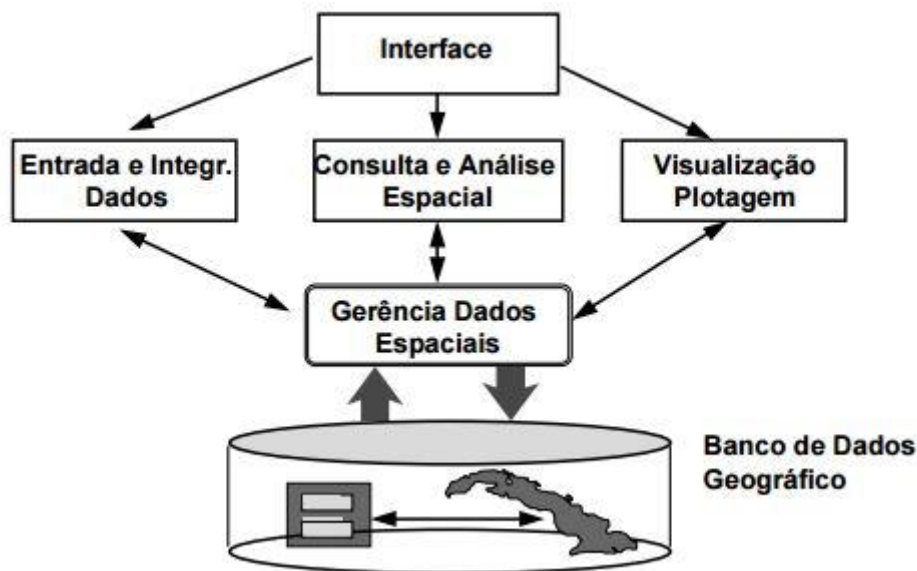


Figura 5. Estrutura de um SIG. Fonte: Barleta (2019)

A utilização de SIG na gestão ambiental tem sido uma tendência nas últimas décadas, principalmente devido às suas propriedades relacionadas à espacialização da análise. A ferramenta é capaz de integrar diversas tecnologias, como a cartografia digital e o processamento digital de imagens, que facilitam o processamento de dados, permitem a projeção de cenários e de cenários, fornecem análises do ambiente e suas mudanças (Abid et al., 2022). Portanto, deve ser utilizado como ferramenta de apoio à gestão e planejamento dos recursos naturais.

Os modelos hidrológicos têm limitações na integração de dados relacionados ao uso e ocupação da terra, topografia e dados de séries temporais de precipitação, fluxo e deposição. No entanto, essas limitações podem ser minimizadas com o uso de SIG e técnicas de geoprocessamento (Asgari et al., 2022). As informações georreferenciadas favorecem o desenvolvimento, validação e eventual aceitação de novos modelos hidrológicos capazes de fornecer o máximo de informações a partir desses novos dados (Chan et al., 2022).

Nesse contexto, com base sistemas de geoprocessamento e tecnologias de computação, além do gerenciamento de dados de validação e otimização das capacidades analíticas, a função de pré-processamento de modelos hidrológicos é simplificada (Fhel et al., 2023). Consequentemente, muitos modelos têm sido desenvolvidos e aprimorados continuamente com sucesso na caracterização de processos hidrológicos e na resolução de problemas ambientais (Abid et al., 2022; Horton et al., 2022).

Modelo SWAT

SWAT é a abreviação de *Soil Water Assessment Tool*, que é um modelo em escala de bacia hidrográfica e foi desenvolvido no âmbito do do Agricultural Research Service (ARS) do United States Department of Agriculture (USDA), (Arnold et al., 1998; Arnold e Fohrer, 2005). O SWAT é um modelo computacional gratuito e de código aberto originalmente desenvolvido para simular processos hidrológicos e prever o impacto das práticas agrícolas nos recursos hídricos, produção de

sedimentos e ciclagem de nutrientes entre pequenos e grandes processos complexos de bacias hidrográficas (Figura 6), levando em consideração

diferentes tipos de solo, usos e coberturas da terra e mudanças climáticas (Priya & Manjula, 2021).

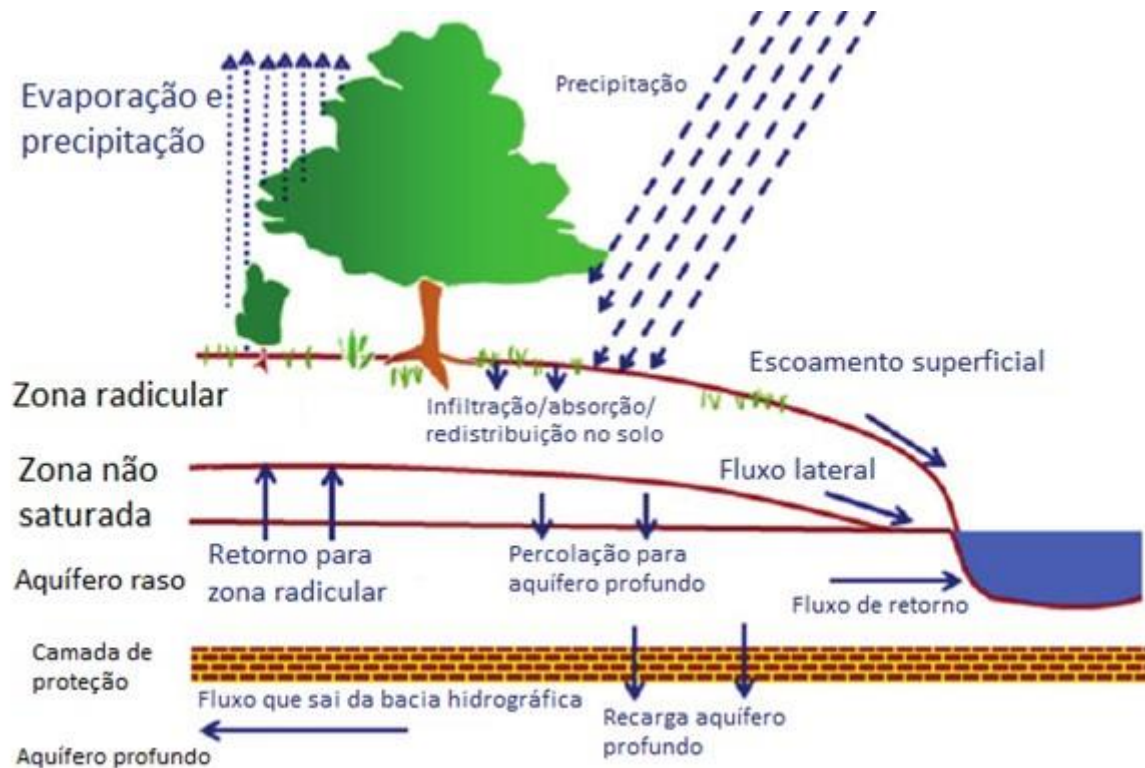


Figura 6. Esquema dos processos hidrológicos simulados no SWAT. Fonte: Gassman et al. (2007).

O modelo SWAT pode simular muitos processos em uma bacia hidrográfica, como a geração de escoamento superficial por precipitação, previsão de erosão do solo e produção de sedimentos associados, crescimento de culturas, estimativa de concentrações de nutrientes e pesticidas em corpos d'água e seu impacto no uso e na gestão agrícola na dinâmica de sedimentos de bacias hidrográficas. (Upadhyay et al., 2022). Por ser um modelo de simulação contínua, permite a análise de problemas observados em bacias hidrográficas por um longo período. Portanto, não foi desenvolvido para simular eventos únicos, como eventos de propagação de enchentes (Tan et al., 2021).

Para a utilização do modelo SWAT é necessária uma grande quantidade de dados sobre a bacia hidrográfica, incluindo dados hidrológicos, climáticos, de solo e de uso e ocupação (Upadhyay et al., 2022). O modelo simula o ciclo de deposição da água através de várias sub-rotinas. Essas sub-rotinas simulam os processos de escoamento superficial e subterrâneo, infiltração, evaporação,

consumo de plantas, escoamento lateral, infiltração e produção de sedimentos. O modelo discretiza a bacia hidrográfica em várias sub-bacias e aplica essas rotinas para cada sub-bacia, levando em consideração suas diferenças nas características hidrológicas. Ademais, cada sub-bacia é dividida em unidades básicas de modelagem denominadas Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), que são unidades de sub-bacias com a mesma combinação de uso do solo, tipo de solo e declividade superficial, proporcionando unidades de descrição física mais homogêneas (Priya & Manjula, 2021; Tan et al., 2021).

Em outras palavras, o SWAT avalia a condição do sistema, a partir dos parâmetros relacionados ao solo e ao sistema hidrológico em cada área estudada. Esse modelo simula os processos de forma sequencial dentro do sistema físico, em um intervalo de tempo, fornecendo séries temporais de saída no modelo (Arnold et al. 2012). Segundo Neitsch et al. (2011), para atender a estas suposições, o SWAT tem os seguintes aspectos:

- Possui uma base física: requer dados e parametrização quanto ao clima, solo, relevo uso e cobertura de terra nas bacias;
- É semi-distribuído: possibilitando, a divisão da bacia em sub-bacias (com parâmetros próprios para cada uma delas) e essas em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs - Hydrologic Response Units), para estudo da variação espacial das características hidrológicas;

- É computacionalmente eficiente: possibilitando a simulação de longos períodos, diários ou mensais, em bacias de diferentes escalas com grande variação nos usos e manejos.

A Figura 7 ilustra os dados de entrada (mapas e dados tabulares) para o funcionamento do SWAT e os processos existentes (delineamento da bacia, balanço hídrico e qualidade da água/produção de sedimentos).

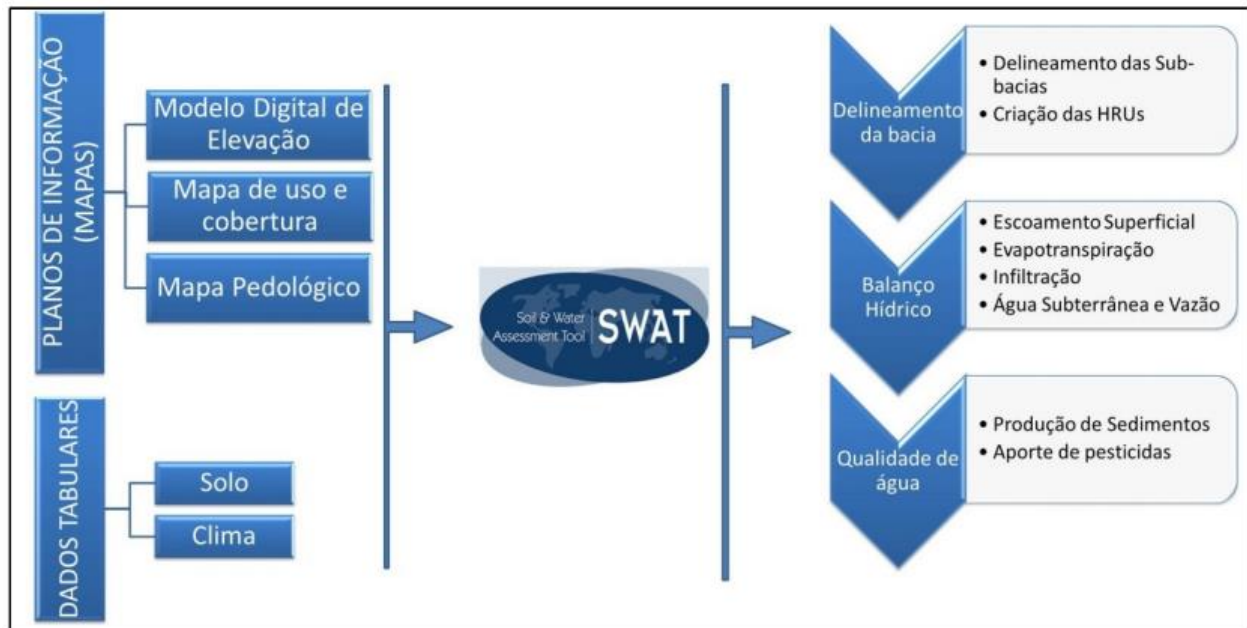


Figura 7. Fluxograma dos dados de entrada no SWAT e resumo de processos. Fonte: Carvalho (2014)

Os principais módulos do modelo SWAT, conforme Arnold et al. (2012), são:

- clima;
- hidrologia,
- temperatura e propriedades do solo;
- crescimento vegetal;
- bactérias e agentes patogênicos;
- nutrientes e pesticidas;
- manejo agrícola.

As simulações dos processos hidrológicos no SWAT são divididas em duas fases, sendo: fase terrestre, que controla a quantidade de água, nutrientes, sedimentos, e pesticidas carregadas para o canal principal do rio em cada sub-bacia. Nesta fase há a quantificação do escoamento superficial, evapotranspiração potencial e real, deslocamento da água pelas camadas de solo, fluxo de base, níveis de erosão, e outros, e a fase de propagação, que está relacionado ao movimento de água,

nutrientes, sedimentos e pesticidas no canal principal em cada sub-bacia até o exutório (Arnold et al., 2012).

O modelo SWAT divide a bacia em sub-bacias, utilizando para isso dados da rede hidrográfica e o relevo, este último obtido pelo Modelo Digital de Elevação (MDE). Dessa forma, as sub-bacias são sub-divididas em inúmeras unidades homogêneas quanto aos atributos do tipo de solo, uso e ocupação do solo, e declividade, sendo denominadas de “*Hydrologic Response Units*” (HRUs) (Neitsch et al., 2011).

Uma HRU é considerada com uma porção dentro de uma sub-bacia com combinações específicas de solo, uso e relevo. As HRUs são as menores unidades geradas pelo modelo SWAT e são relevantes para expressar resultados em um nível detalhado, como por exemplo, um determinado uso e ocupação da terra; tipo de solo; ou faixa de declividade. Através das HRUs torna-se possível a identificação de fontes de poluição, taxas de produção de sedimentos em determinadas

áreas, escoamento superficial, e outros. Assim, podem ser usadas na tomada de decisão, pois por meio destas obtêm-se elevado detalhamento espacial, fundamental para a identificação de fontes poluidoras, áreas propícias à processos erosivos, entre outros (Neitsch et al., 2011; NazarI-Sharabian et al., 2019).

No entanto, os modelos não são representações fiéis dos sistemas reais, fornecendo incertezas aos resultados produzidos pelo modelo. Sendo assim, análise de sensibilidade, calibração, verificação e análise de incerteza nos valores dos parâmetros são procedimentos importantes na modelagem, pois fornecem o grau de confiabilidade dos resultados gerados. (De Andrade Farias et al., 2023; Farias et al., 2023).

A análise de sensibilidade avalia a variabilidade dos dados de saída, em função de alterações nos parâmetros de entrada. Na prática, é um procedimento para identificar os parâmetros de entrada que influenciam os resultados da modelagem, ou seja, os parâmetros mais sensíveis. Essa etapa precede a calibração, processo em que há o ajuste dos valores dos parâmetros de entrada do modelo (respeitando as faixas de incerteza) para determinadas condições locais, comparando os valores simulados (saída) e os dados observados, minimizando incerteza da previsão do modelo (Ozdemir & Leloglu, 2019).

Dessa forma, a modelagem hidrossedimentológica serve de subsídio para tomada de decisões e o planejamento ambiental adequados, principalmente em relação aos recursos hídricos em escala de bacia hidrográfica (Farias et al., 2023; Ramos et al., 2024).

Descrição das Equações do SWAT

O modelo SWAT permite a representação dos processos físicos simulados na bacia hidrográfica (Figura 8), dividida em dois componentes: a fase de água ou escoamento superficial e fase de sedimentos ou erosão e transporte de sedimentos (Silva, 2014).

A partir dos trabalhos de Arnold et al., (1998), Machado (2002), Minoti (2006), Oliveira et al. (2006), Lubitz (2009), Winchell et al. (2010), Arnold et al. (2011), Neitsch et al. (2011), Wagener (2011) e Sousa (2015) serão apresentados, sinteticamente, os principais componentes das fases do ciclo hidrológico simuladas pelo SWAT, que influenciam no escoamento superficial e do transporte de sedimentos, processos que são os mais usuais no SWAT.

Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico no SWAT e a determinação da produção de água da bacia hidrográfica ocorre a partir da Equação 1, sendo a principal equação do modelo, definida pelo balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum (P - Q_{sup} - ET - W_a - Q_{sub}) \quad (Eq. 1)$$

Em que: SW_t : conteúdo final de água no solo (mm); SW_0 : conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como a diferença entre a umidade de capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (mm); t : tempo (dias); P : precipitação pluvial (mm); Q_{sup} : escoamento superficial (mm); ET : evapotranspiração (mm); W_a : percolação (mm), e Q_{sub} : fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

Escoamento Superficial

A estimativa do escoamento superficial é realizada pelo Método da Curva Número (CN) descrito em 1954 pelo do *Soil Conservation Service* (SCS), (Mccuen, 1982) representado nas Equações 2 e 3.

$$Q_{sup} = (P - 0,2S)^2 / (P + 0,8S), P > 0,2S \quad (Eq. 2)$$

$$Q_{sup} = 0, P \leq 0,2S \quad (Eq. 3)$$

Em que, Q_{sup} : escoamento superficial diário (mm); P : precipitação pluvial diária (mm), e S : infiltração potencial máxima (mm).

A infiltração potencial máxima é em função: do tipo e uso do solo; manejo; inclinação do solo; permeabilidade, além de ser temporalmente dependente da variação da quantidade de água no solo (Equação 4).

$$S = 25,4 / (1000 CN - 10) \quad (Eq. 4)$$

O valor de CN é a Curva Número para um dado dia. No método, o CN varia entre 1 e 100: os extremos correspondem, respectivamente, a um solo de condutividade hidráulica infinita até uma cobertura totalmente impermeável (Mccuen, 1982).

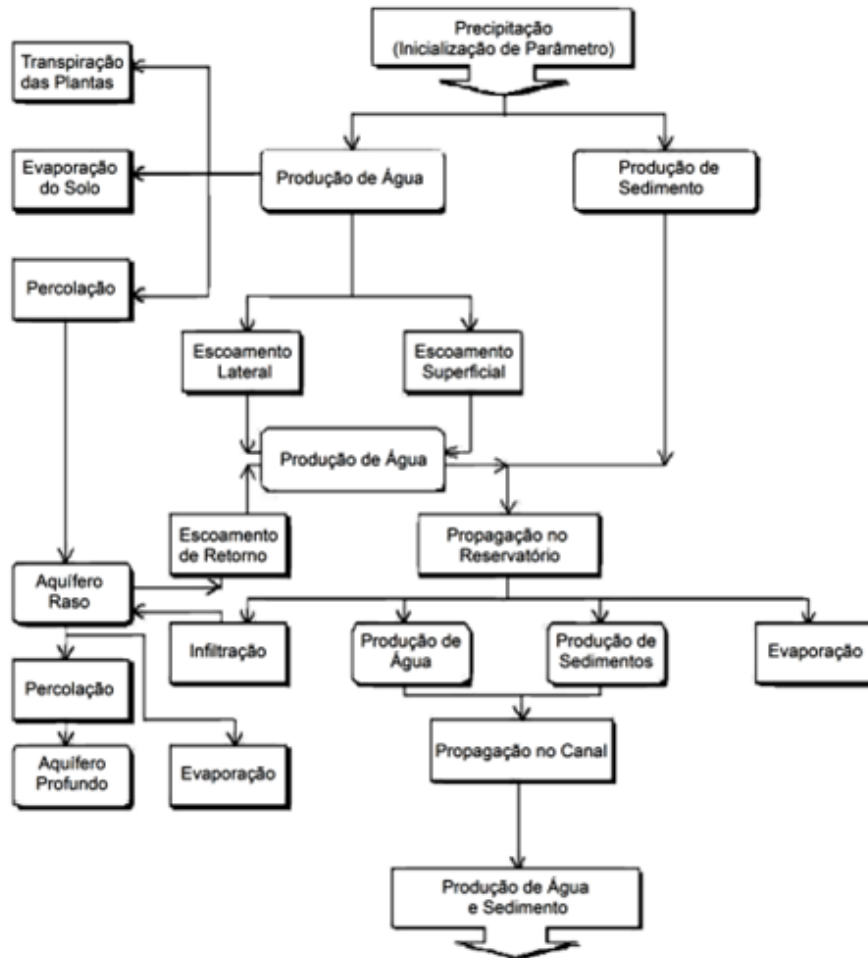


Figura 8. Fluxograma das equações existentes no SWAT para cada HRU. Fonte: Adaptado de King et al. (1996)

Evapotranspiração Potencial

A evapotranspiração potencial é calculada pelo método de Penman Monteith, conforme Equação 5, que considera variáveis como: radiação solar (S), temperatura (T), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (V).

$$ETP = \frac{(0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T_a + 273)} u_2 (e_s - e_a))}{(\Delta + \gamma (1 + 0,34u_2))} \quad (Eq. 5)$$

Sendo que: R_n : Saldo de Radiação ($Mj/m^2 \text{ dia}^{-1}$); G : Fluxo de calor no solo ($Mj \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T_a : Temperatura média do ar ($^{\circ}C$); u_2 : Velocidade média diária do vento a 2m de altura; e_s : Pressão de saturação de vapor média diária (kPa); e_a : Pressão atual de vapor média diária (kPa); Δ : Declividade da curva de pressão de vapor; Γ : Constante psicrométrica (kPa/ $^{\circ}C$).

Escoamento Lateral

O Escoamento Lateral caracteriza-se a partir do momento em que a água percolada verticalmente encontra uma camada impermeável, acumulando-se, formando uma zona saturada e dando origem ao escoamento lateral. É calculado a partir do modelo de armazenamento cinemático (Equação 6).

$$Q_{lat} = 0,024 \cdot ((2 \cdot \int SW \cdot (ly, excess) \cdot K_{sat} \cdot Slp) / (\phi_d \cdot L_{hill})) \quad (Eq. 6)$$

Em que Q_{lat} = é a descarga de água da rampa de saída ($mm \cdot dia^{-1}$); $SW_{lyexcess}$ = é o volume drenável da água armazenada na zona saturada da rampa por unidade de área (mm); K_{sat} = é a condutividade hidráulica saturada ($mm \cdot h^{-1}$); slp = é a declividade da rampa ($m \cdot m^{-1}$); ϕ_d = é a porosidade drenável da camada de solo ($mm \cdot mm^{-1}$); L_{hill} = é o comprimento da rampa (m).

Sedimentos

A perda de solo por erosão é determinada através da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MEUPS), apresentada na Equação 7.

$$Sed = 11,8 (Q_{sup} + q_{pico} + \frac{ÁREA_{HRU}}{0,56 \times K} \times C \times LS \times P \times CFRG) \quad (Eq. 7)$$

Sendo sed: produção de sedimentos após evento de precipitação no dia (Ton); Q_{sup} : escoamento superficial (mm); q_{pico} : vazão de pico do escoamento (m^3/s); $ÁREA_{HRU}$: área da Unidade de Resposta Hidrológica (ha); K: erodibilidade do solo [$(0,013 \text{ ton } m^2 \text{ hr})/(m^3 \text{ ton } cm)$]; C: é o fator de uso e manejo do solo (adimensional); LS: fator topográfico (adimensional); P: fator das práticas conservacionistas (adimensional), e CFRG: fator de fragmentação esparsa (adimensional).

No Brasil e no mundo o modelo SWAT tem sido amplamente utilizado para modelar bacias hidrográficas de diferentes escalas para diferentes propósitos: avaliar os efeitos da mudança do uso da terra; potencial para produção e transporte de sedimentos; disponibilidade de água; impactos hidrológicos e mudanças climáticas (Essenfelder e Giuppone, 2020; Chagas et al., 2022; De Andrade Farias et al., 2023). Entretanto, nos últimos anos, esse modelo tem sido utilizado na análise da transferência de águas entre bacias, especialmente em países como a China e Coreia do Sul (Kim et al., 2020a, b; Chagas et al., 2022).

Aplicação do modelo SWAT no Brasil

Nos últimos anos, a aplicação do SWAT nas bacias hidrográficas brasileiras tem chamado a atenção. Dificuldades na gestão dos recursos hídricos e acedentes transformações no uso e ocupação do solo são determinantes do crescimento do *software* no país (Martins et al., 2020; De Farias et al., 2023).

Nesse âmbito, Martins et al. (2020) objetivaram calibrar e validar o modelo SWAT para a variável vazão, tendo como área de estudo a bacia do Ribeirão do Pinhal em São Paulo. O modelo foi calibrado e validado com os seguintes parâmetros estatísticos: NSE de 0,64 e 0,68; PBIAS de 15,2 e 2,8; e RSR de 0,60 e 0,56 respectivamente. Assim, indicando que o modelo pode ser utilizado na gestão dos recursos hídricos para a área de estudo.

Em Minas Gerais, Passos et al. (2021) realizaram uma análise de impacto das vazões sob cinco cenários de uso da terra em uma pequena bacia hidrográfica. Os resultados apresentaram que o *software* SWAT pode ser utilizado em pequenas

escalas e que os cenários de manejo agrícola e reflorestamento foram os mais eficazes na diminuição da vazão.

No semiárido do Brasil, Brito et al. (2021) tiveram por objetivo avaliar a evapotranspiração estimada por MODIS e pelo balanço hídrico através do modelo SWAT, na bacia hidrográfica do Pontal, Pernambuco. Os resultados revelam uma grande dependência do escoamento superficial e evapotranspiração real ao volume total precipitado na bacia, sendo que os maiores volumes de água escoada estão presentes em áreas de solo exposto e agropecuária.

Tibúrcio et al. (2023) verificaram cenários de possíveis mudanças climáticas e seus impactos em uma pequena bacia, também, no semiárido pernambucano, por meio do modelo SWAT. Os resultados exibem uma diminuição do fluxo de base e crescimento das perdas por evapotranspiração em todos os cenários verificados, o que aponta para uma significativa perda da disponibilidade hídrica local.

Na Região Sul do país, Castro & Machado (2019) tiveram por objetivo calibrar e validar o modelo SWAT para a bacia do Rio das Pedras, em Guarapuava, Paraná. Os resultados do Índice de Nash & Sutcliffe alterado (COE), do percentual de tendência (PBIAS), e o coeficiente de determinação (R^2) foram, respectivamente, 0,69, -0,5 e 0,7, indicando um bom ajuste entre os dados simulados e observados para a variável vazão.

Trentin et al. (2023) ao estudarem a vazão da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria, na região do bioma Pampa, por meio do modelo SWAT, para um cenário de mudanças do uso e ocupação do solo, verificaram que a vazão média anual aumentou 17,7%. Os autores justificam esse aumento devido ao crescimento das lavouras de soja, e sugerem a substituição dessas áreas para diminuir os riscos de inundações na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria.

No Tocantins, Rodrigues et al. (2021) desenvolveram uma simulação hidrológica na bacia do rio Sono, no Parque Estadual do Jalapão, através do modelo SWAT. Os resultados dos índices estatísticos para calibração e validação do modelo foram respectivamente: NSE de 0,55 e 0,56 e valores de PBIAS de 8,2% e -10,2%. Desse modo, indicando a eficácia do SWAT na simulação da vazão para a área de estudo e na gestão dos recursos hídricos dessa importante região ecológica do Brasil.

Rufino et al. (2022) utilizaram o modelo SWAT para simular a vazão e o balanço hidrológico da bacia hidrográfica do rio Jari, na Amazônia brasileira, com dados de entrada baseados em sensoriamento remoto orbital. Os

índices estatísticos indicam uma boa simulação do modelo com NSE de 0,85 e 0,89, RSR de 0,39 e 0,33 e um PBIAS de -9,5 e -0,6, respectivamente para calibração e validação. Em síntese, os autores concluíram que o modelo SWAT é eficaz na simulação hidrológica em bacias tropicais.

Na Região Centro-Oeste do Brasil, Martins Rodrigues et al. (2021) modelaram a vazão diária de uma bacia hidrográfica do bioma Cerrado, aplicando duas abordagens: o modelo SWAT, e outro baseado em Rede Neural Artificial - RNA. Os resultados apontam que ambos os modelos são adequados na simulação diária de vazão para a área de estudo com os seguintes parâmetros estatísticos: NSE de 0,61 e 0,91 e R^2 de 0,68 e 0,79, respectivamente para os modelos SWAT e RNA.

Ferreira et al. (2021) tiveram por objetivo verificar a capacidade do modelo SWAT em simular a evapotranspiração da bacia do Ribeirão do Gama, localizada na porção sul do Distrito Federal, com predomínio do bioma Cerrado. Os resultados mostram que o método Penman - Monteith (PM) apresentou o melhor ajuste na simulação da evapotranspiração.

Aplicação do modelo SWAT na transposição de bacias

Devido à grande eficácia no desempenho do modelo SWAT na simulação do escoamento superficial e representação do ciclo hidrológico, esse modelo vem sendo utilizados para diversas outras representações, entre elas vem ganhando destaque, nos últimos anos, a aplicação do modelo SWAT na transferência de água entre bacias em algumas partes do mundo.

Marak et al. (2020) aplicaram o modelo SWAT para simular a vazão da transferência de água para fora da bacia hidrográfica Umiam, nordeste da Índia. Verificaram que a calibração e validação diária levou a resultados satisfatórios com valores de forma que os valores dos coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e coeficiente de determinação (R^2) resultaram, respectivamente, em 0,64 e 0,69, para a calibração, e 0,54 e 0,58 para a validação, indicando a eficácia do modelo na simulação hidrológica.

O trabalho de Li et al. (2015) que avaliou as implicações do clima e das mudanças do uso da terra no escoamento do alto rio Han e rio Luan no Projeto de Transferência de Água do Sul para o Norte na China, considerado o maior projeto mundial de transferência de água entre bacias, concluiu que os modelos SWAT calibrados previram séries mensais de escoamento próximo as séries de escoamentos observados, e os modelos também tiveram um bom desempenho no período

de validação, embora alguns picos tenham sido super ou subestimados.

Na Etiópia, o estudo de Abid et al. (2022) empregou o modelo SWAT como ferramenta de apoio a decisão considerando questões econômicas, sociais e ambientais para selecionar a melhor alternativa de transferência de água da bacia do Baro Akobo para a bacia do Awash. Verificou-se, nos resultados, eficiência do modelo para as três alternativas propostas no estudo. No trabalho de Shrestha et al. (2019), que analisou o impacto das mudanças climáticas no plano de desvio de água entre bacias no Nepal, o SWAT foi usado para simular a futura disponibilidade de água para três rios considerando vários cenários. O modelo foi calibrado, validado e mostrou-se muito eficaz em todas as três simulações para indicar como alocar vazão para cada um dos três rios.

O estudo de Kim et al. (2020a) utilizaram o modelo SWAT para avaliar a situação da transferência inter-bacias da bacia do rio Seomjin para a bacia do rio Yeongsan, na Coreia do Sul. O modelo foi calibrado e validado com dados da bacia receptora relativos a 13 anos de observação. Os resultados foram muito satisfatórios de forma que o erro quadrático médio (MSE) e o coeficiente NSE foram 0,62 e 0,86, respectivamente.

Outro estudo de transferência de água aplicado na bacia do rio Yeongsan usando SWAT foi desenvolvido por Kim et al. (2020b). Esse estudo avaliou apenas as vazões de saída com resultados de R^2 , NSE, MSE e viés percentual (PBIAS) de 0,69 ~ 0,81, 0,61 ~ 0,70, 1,34 ~ 2,60 mm/dia e -8,3% ~ +7,6%, respectivamente. Ambos os estudos concluíram como eficiente os resultados da modelagem no SWAT.

Em estudo sobre as alterações hidrológicas na bacia do rio Man-gyeong, na Coreia do Sul, com base em cenários futuros de mudanças climáticas extremas, Woo et al. (2020) utilizaram o modelo SWAT acoplado a outros modelos e alcançaram resultados para a vazão de saída com um R^2 de 0,70 e NSE de 0,51, demonstrando eficácia no método aplicado.

Na Espanha Senent-Aparicio et al. (2021) utilizaram o modelo SWAT para prever o efeito das mudanças do clima na transferência de água entre as bacias dos rios Tejo e Segura. Os resultados deste estudo indicam um declínio consistente na precipitação e um aumento na temperatura e evaporação em todos os cenários de impacto climático analisados, o que pode reduzir os volumes de água que podem ser transferidos para a bacia do Segura em mais de 60%, em relação a modelagem hidrológica o SWAT desempenhou bem sua função e foi considerado um modelo satisfatório para os autores.

Essenfelder e Giuppone (2020) utilizaram o SWAT na simulação do processo de transposição de água entre as bacias dos rios Dese e Zero, que ficam no nordeste da Itália. Entretanto, esse estudo associou o modelo SWAT com um outro modelo utilizando a técnica de redes neurais artificiais, e o resultado foi considerado satisfatório pelos autores, sendo capaz não só de reproduzir o balanço hídrico da bacia hidrográfica estudada (receptora), mas também de aumentar a capacidade de modelagem hidrológica do modelo SWAT.

Considerações Finais

A Transferência de água entre bacias envolve muitas vezes um processo de tomada de decisão complexo, que depende de fatores que vão desde as condições hidrometeorológicas até as pressões socioeconômicas. Essa alternativa vem ganhando destaque em diversas partes do mundo, e sendo utilizada tanto em pequenas como em grandes bacias hidrográficas, especialmente, devido a insuficiência hídrica nas bacias receptoras.

Apesar de poucos trabalhos aplicarem o modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) na modelagem hidrológica visando analisar os impactos positivos e negativos da transferência de água entre bacias, essa ferramenta demonstrou bom desempenho quando aplicada nesse tipo de simulação, bem como, quando acoplada com outros modelos.

Agradecimentos

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ), à Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), e ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia Ambiental (GPTecA).

Referências

Abid, S. K.; Sulaiman, N.; Mahmud, N. P. N.; Nazir, U.; Adnan, N. A. 2022. A review on the application of remote sensing and geographic information system in flood crisis management. *Science and Technology*, v. 02, n. 01.

Alamanos, A.; Latinopoulos, D.; Papaioannou, G.; Mylopoulos, N. 2019. Integrated hydro-economic modeling for sustainable water resources management in data-scarce areas: The case of lake Karla watershed in Greece. *Water Resources Management*, v. 33, p. 2775-2790.

Affessa, G. M.; Belew, A. Z.; Tenagashaw, D. Y.; Tamirat, D. M. 2022. Land use/cover change impacts on hydrology using SWAT model on

Borkena Watershed, Ethiopia. *Water Conservation Science and Engineering*, v. 7, n. 1, p. 55-63.

Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams. 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *J. American Water Resour. Assoc.* 34(1): 73-89.

Arnold, J. G., and N. Fohrer. 2005. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrol. Process.* 19(3): 563-572.

Arnold, J. G.; Moriasi, D. N.; Gassman, P. W.; Abbaspour, K. C.; White, M. J.; Srinivasan, R.; Santhi, C.; Harmel, R. D.; Van Griensven, A.; Van lieuw, M. W.; Kannan, N.; Jha, M. K. 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*. v. 55, n. 4, p. 1491-1508.

Asgari, M.; Yang, W.; Lindsay, J.; Tolson, B.; Dehnavi, M. M. 2022. A review of parallel computing applications in calibrating watershed hydrologic models. *Environmental Modelling & Software*, 105370.

Borrelli, P.; Robinson, D. A.; Panagos, P.; Lugato, E.; Yang, J. E., Alewell, C.; Ballabio, C. 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 117, n. 36, p. 21994-22001.

Borrelli, P.; Alewell, C.; Alvarez, P.; Anache, J. A. A.; Baartman, J., Ballabio, C.; Panagos, P. 2021. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the total environment*, v. 780, n. 146494.

Borella, D. R., Castagna, D., Garcia, A. C., Alves, M. A. B., Zolin, C. A., Almeida, F. T., Souza, A. P. de. 2024. Morphometry, Water Availability and Sediment Transport in the River Renato Watershed, Southern Amazon. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n.01, p. 297-314.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Portal Planalto. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm .

Brewer, C. J.; Hampson, G. J.; Whittaker, A. C.; Roberts, G. G.; Watkins, S. E. 2020. Comparison of methods to estimate sediment

- flux in ancient sediment routing systems. *Earth-science reviews*, v. 207, n. 103217.
- Brito., P., V., Miranda., R., Q., Morais., Y., C., B., Costa., V., S., O., Moura., M., S., B., Silva., A., S., A., Galvinctio., J., D. 2021. Avaliação da evapotranspiração estimada pelo MODIS e do balanço hídrico para a bacia do Pontal-Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n.05, p. 2866-2877.
- Burdon Fj, Ramberg E, Sargac J, Forio Mae, De Saeyer N, Mutinova Pt, Moe Tf, Pavelescu Mo, Dinu V, Cazacu C, Witing F, Kupilas B, Grandin U, Volk M, Rîşnoveanu G, Goethals P, Friberg N, Johnson Rk, Mckie B. 2020. Assessing the Benefits of Forested Riparian Zones: A Qualitative Index of Riparian Integrity Is Positively Associated with Ecological Status in European Streams. *Water*. 12(4):1178.
- Caballero, C. B.; Ruhoff, A.; Biggs, T. 2022. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. *Science of The Total Environment*, v. 808, n. 152134.
- Carreiro, D. de A., Silva, T. J. R. D. da, Ferreira, M.K. de S. e Medeiros, F.C. de A., 2022. Caracterização Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Riacho Catolé, Paraíba, Brasil. *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. 15, 3 (dic. 2022), 1286–1300. DOI:<https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.3.81218>.
- Castro, R. A., Macahdo, E. 2019. Análise de sensibilidade de parâmetros hidrológicos na bacia do Rio Das Pedras Guarapuava-PR. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12, 1746-1756.
- Carvalho, F. H. Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro. 2014. 154f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2014.
- Chan, S. W.; Abid, S. K.; Sulaiman, N.; Nazir, U.; Azam, K. 2022. A systematic review of the flood vulnerability using geographic information system. *Heliyon*, n. 09075.
- Chagas, A. M. S.; De Montenegro, A. A.; Lins, F. A. C.; De Andrade Farias, C. W. L. 2022. Análise da umidade do solo em bacia experimental no semiárido pernambucano utilizando o modelo SWAT. *Agronometeoros*, v. 30.
- Cole, L.J.; Stockan, J.; Helliwell, R. 2020. Managing riparian buffer strips to optimise ecosystem services: A review. *Agric. Ecosyst. Environ.*
- De Abreu, M. C. G; & Nunes, L. S. C. 2022. A gestão de recursos hídricos no Estado de São Paulo, a crise hídrica dos anos 2013-2015 e a transposição de águas entre bacias hidrográficas. *Anais do Encontro Nacional de Pós-graduação*, v. 6, n. 1, p. 128-133.
- De Andrade Farias, C. W. L., De Souza Viana, J. F., De Queiroga Miranda, R., Da Silva, S. F., Vasco, G., Montenegro, S. M. G. L., & Galvinctio, J. D. 2023. Técnica de calibração para modelagem da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil, utilizando o SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(3), p. 1621-1628.
- De Medeiros, E. R.; Carvalho, T. S.; De Souza, K. B. 2022. São Francisco River Transposition Project: Socio-economic impacts in Brazilian Northeast semi-arid region. *Papers in Regional Science*, v. 01, p. 30-64.
- De Mello, K.; Taniwaki, R. H.; De Paula, F. R.; Valente, R. A.; Randhir, T. O.; Macedo, D. R.; Hughes, R. M. 2020. Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 270, n. 110879.
- De Morais, E. A.; De Carvalho, J. S. F.; De Almeida, P. L. R.; De Alcântara, H. M.; Da Costa Medeiros, P. 2020. Conflitos de acesso e uso da água na bacia do rio Paraíba após operação do projeto de integração do rio São Francisco. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 1, p. 5098-5108.
- Ebabu, K.; Tsunekawa, A.; Haregeweyn, N.; Tsubo, M.; Adgo, E.; Fenta, A. A. E Poesen, J. 2022. Global analysis of cover management and support practice factors that control soil erosion and conservation. *International Soil and Water Conservation Research*, 10,. 161-176.
- Essenfelder, A. H.; Giupponi, C. 2020. A coupled hydrologic-machine learning modelling framework to support hydrologic modelling in river basins under Interbasin Water Transfer regimes. *Environmental Modelling & Software*, v. 131,. 104779.
- Esfandeh, S.; Danekhar, A.; Salmanmahiny, A.; Sadeghi, S. M. M.; Marcu, M. V. 2022. Climate change risk of urban growth and land use/land cover conversion: An in-depth review of the recent research in Iran. *Sustainability*, 114, 338.
- Farias, C., Miranda, R., Viana, J., Lins, F., Pereira, J. A., Ursulino, B., Montenegro, S., Galvinctio, J. D., Montenegro, A., Srinivasan, R. 2023. Calibration of SWAT model in the Pernambuco state watersheds to support the SUPer system.

- Revista Brasileira de Geografia Física, v. 16, n.06, p. 3572-3592.
- Ferreira, A. D. N., de Almeida, A., Koide, S., Minoti, R. T., & Siqueira, M. B. B. D. 2021. Evaluation of evapotranspiration in Brazilian Cerrado Biome simulated with the SWAT model. *Water*, v.13, n. 15, p. 2037.
- Fhel, B. E.; Idri, A.; Sardi, L. 2023. Free Mobile Geographic Information Apps Functionalities: A Systematic Review. *Recent Advances in Computer Science and Communications*, v. 16, n. 3, p. 2-26.
- Flörke, M.; Schneider, C.; Mcdonald, R. I. 2018. Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. *Nature Sustainability*, 1–1, p. 51–58.
- Gassman, P. W.; Reyes, M. R.; Green, C. H.; Arnold, J. G. the soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*. 50(4): 1211-1250. 2007. doi: 10.13031/2013.23637.
- Guo, Y.; Zhang, Y.; Zhang, L.; Wang, Z. 2021. Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: A comprehensive review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 8, n. 1, p. 1487.
- Graziano, M. P.; Deguire, A. K.; Surasinghe, T. D. 2022. Riparian buffers as a critical landscape feature: Insights for riverscape conservation and policy renovations. *Diversity*, v. 14, n. 3, p. 172.
- Herrera, P. A.; Marazuela, M. A.; Hofmann, T. 2022. Parameter estimation and uncertainty analysis in hydrological modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 9, n. 1, p. 1569.
- Horton, P.; Schaefli, B.; Kauzlaric, M. 2022. Why do we have so many different hydrological models? A review based on the case of Switzerland. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 9, n. 1, p. 1574.
- Huang, Longyang; Wang, Jing; Chen, Xiaojie. Ecological infrastructure planning of large river basin to promote nature conservation and ecosystem functions. *Journal of Environmental Management*, 2022, 306: 114482.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. 2022. Available on: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acessado em: Outubro, 2022.
- Kim, Y. W.; Lee, J. W.; Woo, S. Y.; Kim, S. J. 2020a. Inter-basin water transfer modeling from Seomjin river to Yeongsan river using SWAT. *Journal of Korea Water Resources Association*, v. 53, n. 1, p. 10-3741.
- Kim, Y. W.; Lee, J. W.; Woo, S. Y.; Kim, S. J. 2020b. Evaluation of stream flow and water quality changes of Yeongsan river basin by inter-basin water transfer using SWAT. *Journal of Korea Water Resources Association*, v. 53, n. 12, p. 1081-1095.
- Konapala, G.; Mishra, A. K.; Wada, Y.; Mann, M. E. 2020. Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature communications*, v. 11, n. 1, p. 3044.
- Le Mesnil, M.; Charlier, J.-B.; Moussa, R.; Caballero, Y.; Dörfliger, N. 2020. Interbasin Groundwater Flow: Characterization, Role of karst areas, Impact on annual water balance and flood processes. *Journal of Hydrology*. 02, 105-119.
- Lee, S., Bae, J. H., Hong, J., Yang, D., Panagos, P., Borrelli, P., E Lim, K. J. 2022. Estimation of rainfall erosivity factor in Italy and Switzerland using Bayesian optimization based machine learning models. *Catena*, 211, 105957.
- Li, L., Zhang, L., Xia, J., Gippel, C. J., Wang, R., & Zeng, S. 2015. Implications of modelled climate and land cover changes on runoff in the middle route of the south to north water transfer project in China. *Water Resources Management*, 29, 2563-2579.
- Lima, T. B. R. 2020. Resposta hidrológica de uma grande bacia hidrográfica no semiárido brasileiro diante de cenários de transposição hídrica e racionalização do uso de reservatórios não estratégicos.
- Lubitz, E. 2009. Avaliação da aplicação do modelo hidrológico SWAT à Bacia do Ribeirão Concórdia – Lontras, SC. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Ambiental, Universidade Regional de Blumenau. 125p.
- Machado, R. E. 2002. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Piracicaba. Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 152p.
- Martins Rodrigues, J. A., de Oliveira Andrade, A. C., Viola, M. R., Ferreira, D. D., de Mello, C. R., & Thebaldi, M. S. 2021. Modelagem hidrológica em uma bacia do bioma Cerrado brasileiro. *Revista Ambiente e Água*, v. 16, n. 01.
- Martins, L.L., Martins, W.A., Moraes, J.F.L., Pedro Júnior, M.J., De Maria, I.C. 2020. Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n.02, p. 576-594.

- Malutta, S., Kobiyama, M., Chaffe, P. L. B., E Bonumá, N. B. 2020. Hysteresis analysis to quantify and qualify the sediment dynamics: State of the art. *Water Science and Technology*, 81(12), 2471-2487.
- Marin, M., Clinciu, I., Tudose, N. C., Ungurean, C., Adorjani, A., Mihalache, A. L., Cacovean, H. 2020. Assessing the vulnerability of water resources in the context of climate changes in a small, forested watershed using SWAT: a review. *Environmental research*, 184, 109330.
- Marak, J. D. K., Sarma, A. K., & Bhattacharjya, R. K. 2020. Assessing the impacts of interbasin water transfer reservoir on streamflow. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(10), 05020034.
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. 2021. Impact of climate change on agriculture and its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability*, 13(3), 1318.
- Martinez-Villalobos, Cristian; Neelin, J. David. 2023. Regionally high risk increase for precipitation extreme events under global warming. *Scientific Reports*, 13.1: p. 5579.
- Mccuen, R. H. 1982. A guide to hydrologic analysis using SCS methods. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, N.J. [ISBN 0-13-370205-7], p. 145.
- Milazzo, F., Francksen, R. M., Zavattaro, L., Abdalla, M., Hejduk, S., Enri, S. R., E Vanwalleghe, T. 2023. The role of grassland for erosion and flood mitigation in Europe: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 348, 108443.
- Minoti, R. T. 2006. Abordagens qualitativa e quantitativa de micro-bacias hidrografias e áreas alagáveis de um compartimento do médio mogisuperior, SP. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 231.
- Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR). 2022. Projeto de Integração do Rio São Francisco: Andamento das obras. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/projeto-sao-francisco> . Acesso em: 17 de dez. 2022.
- Moges, E., Demissie, Y., Larsen, L., E Yassin, F. 2021. Sources of hydrological model uncertainties and advances in their analysis. *Water*, 13(1), 28.
- Najafi, S., Dragovich, D., Heckmann, T., E Sadeghi, S. H. 2021. Sediment connectivity concepts and approaches. *Catena*, 196, 104880.
- Nascimento, J. C.; Melo, M. G. M. A.; Oliveira, L. M. M.; Cabral, J. J. S. P.; Paiva, A. L. R. de. 2023. Evaporação em pequenos reservatórios, com diferentes coberturas, na região do Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n.06, p. 3088-3102.
- Nações Unidas/Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais (UN/DESA). 2019. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Key-Facts. Working Paper No. ESA/P/WP.252. New York: United Nations.
- Nazari-Sharabian, M.; Taheriyoun, M.; Ahmad, S.; Karakouzian, M.; Ahmadi, A. 2019. Water Quality Modeling of Mahabad Dam Watershed-Reservoir System under Climate Change Conditions, Using SWAT, and System Dynamics. *Water*, 11, 394.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Willians Grassland, J.R. 2011. SOIL AND WATER RESEARCH LABORATORY. Soil and Water Assessment Tool theoretical Documentation Version 2009. Agricultural Research Service Blackland Research Center – Texas Agrilife Research. Texas A&M University System.
- Niknamian, S., 2019. Resource-economic growth nexus, role of governance, financial development, globalization and war: dynamic approach. *Financial Development, Globalization and War: Dynamic Approach*, 4.
- Olivera, F.; Valenzuela, M.; Srinivasan, R.; Choi, J.; Cho, H., Koka, S., Agrawal, A. 2006. ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS interface for SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*. v. n. 2, p. 295-309.
- Ozdemir, A.; Leloglu, U.M. 2019. A fast and automated hydrologic calibration tool for SWAT. *Water and Environment Journal*, 33: p. 488-498.
- Padulano, R., Rianna, G., & Santini, M. 2021. Datasets and approaches for the estimation of rainfall erosivity over Italy: A comprehensive comparison study and a new method. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34, 100788.
- Passos, F. O.; Silva, B. C. Silva, F. G. B. 2021. Avaliação de Impactos de Mudanças no Uso e Manejo do Solo Sobre as Vazões da Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira, Utilizando o Modelo SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n.02, p. 619-633.
- Priya, R. Y., E Manjula, R. 2021. A review for comparing SWAT and SWAT coupled models and its applications. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7190-7194.
- Possantti, I. B., & Marques, G. F. 2019. Soluções baseadas na natureza para sistemas hídricos de cidades: conceituação e modelagem a nível de planejamento. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (23.: Foz do Iguaçu, 2019)*. Anais [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRH, 2019.

- Ramos, R. R. S., Silva, C. R., Araújo, A. A., Barbosa, M. I. M., Pacheco, A. P., Oliveira, J. L. 2024. Análise da Fragilidade Ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão/MG a Partir de Redes Neurais Artificiais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n.02, p. 1060-1070.
- Rossoni, R. B., & Fan, F. M. 2023. Abordagem de discretização para modelagem de sedimentos em grande escala: estratégias de calibração baseadas na variabilidade hidrossedimentológica em múltiplas escalas espaciais. *RBRH*, 28, e0.
- Rodrigues, J. A. M.; Junqueira, R.; Amorim, J. S.; Alves, B. T. S.; Viola, M. R. 2021. Modelagem hidrológica na bacia do rio Sono, região de proteção ambiental do Jalapão, savana brasileira. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n.02, p. 1131-1142.
- Rufino, P. R., Gücker, B., Faramarzi, M., Boëchat, I. G., Cardozo, F. D. S., Santos, P. R., Pereira, G. 2022. Evaluation of the SWAT Model for the Simulation of Flow and Water Balance Based on Orbital Data in a Poorly Monitored Basin in the Brazilian Amazon. *Geographies*, v. 3, n. 01, p. 1-18.
- Salinas, C. E. T., Oliveira, V. P. V. D., Brito, L., Ferreira, A. V., & De Araújo, J. C. 2019. Social impacts of a large-dam construction: the case of Castanhão, Brazil. *Water International*, 44(8), 871-885.
- Sartorio, L. F., Maier, E. L. B. 2024. Land Use and Cover Changes in Brazilian Biomes between 1985 and 2018. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n.01, p. 508-528.
- Sauer, I. J., Reese, R., Otto, C., Geiger, T., Willner, S. N., Guillod, B. P., ... & Frieler, K. 2021. Climate signals in river flood damages emerge under sound regional disaggregation. *Nature Communications*, 12(1), p. 2128.
- Senent-Aparicio, J., López-Ballesteros, A., Cabezas F., Cabezas F., Molina-Navarro F. 2021. A Modelling Approach to Forecast the Effect of Climate Change on the Tagus-Segura Interbasin Water Transfer. *Water Resources Management*, 35 (11), 3791–3808.
- Serrão, E. A. O., Silva, M. T., Ferreira, T. R., De Ataíde, L. C. P., Dos Santos, C. A., De Lima, A. M. M., Gomes, D. J. C. 2022. Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model. *International Journal of Sediment Research*, 37(1), 54-69.
- Shittu, W., Adedoyin, F. F., Shah, M. I., & Musibau, H. O. 2021. An investigation of the nexus between natural resources, environmental performance, energy security and environmental degradation: Evidence from Asia. *Resources Policy*, 73, 102227.
- Shrestha, S., Shrestha, M., & Babel, M. S. 2019. Assessment of climate change impact on water diversion strategies of Melamchi Water Supply Project in Nepal. *Theoretical and Applied Climatology*, 128, 311-323.
- Silva, L. R. M., Barbosa, H. A.; Santos, A. M. 2024. Variabilidade e tendência espaço-temporal da caatinga relacionadas com a degradação ambiental no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n.02, p. 804-823.
- Silva, T. J. R. D., Leite, J. C. A., Cavalcanti, A. K. G., Dantas, J. S., Sousa, F. D., Nascimento, M. D., Medeiros, J. L. S., Neto, O. R., Campos, G. M., e Santos, L. D. A., 2021a. Análise da Susceptibilidade à Erosão Hídrica em uma Bacia Hidrográfica do Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(3), 1443-1457.
- Silva, T. J. R. D., Santos, L. L., Paiva, W., Medeiros, J. L. S., Nascimento, M. B., Rocha Neto, O., Carreiro, D. A., Martildes, J. A., Silva, A. F., 2021b. Avaliação geomorfológica e uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio Aguiar, Paraíba, Brasil: uma abordagem ambiental baseada em SIG. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.4, p.426-438, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0033>
- Silva, T.J.R.D. da, Medeiros, J.L. da S., Nascimento, M.B., Cezario, J.A., Carreiro, D. de A., Santos, L.L., e Paiva, W. de 2022., Análise Estatística Da Precipitação E Da Erosividade Das Chuvas No Semiárido Paraibano, Nordeste Do Brasil. *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. 15, 2 (ago. 2022), 941–956. DOI:<https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79997>.
- Sinha, P., Rollason, E., Bracken, L. J., Wainwright, J., & Reaney, S. M. 2020. A new framework for integrated, holistic, and transparent evaluation of inter-basin water transfer schemes. *Science of The Total Environment*, 721, 137646.
- Sorando, R., Comín, F. A., Jiménez, J. J., Sánchez-Pérez, J. M., & Sauvage, S. 2019. Water resources and nitrate discharges in relation to agricultural land uses in an intensively irrigated watershed. *Science of the Total Environment*, 659, 1293-1306.
- Sousa, A. M. L. D.; Vitorino, M. I.; Castro, N. M. D. R.; Botelho, M. D. N.; Souza, P. J. O. P. D. 2015. Evapotranspiration from Remote Sensing

- to Improve the Swat Model in Eastern Amazonia. *Floresta e Ambiente*, v. 22, n. 4, p. 456-464.
- Tan, M. L., Gassman, P. W., Liang, J., E Haywood, J. M. 2021. A review of alternative climate products for SWAT modelling: Sources, assessment and future directions. *Science of the Total Environment*, 795, 148915.
- Tibúrcio, I. M.; Silveira, N. T.; Santos, T.O.; Miranda, R.Q.; Galvêncio, J.D. 2023. Balanço Hídrico e Mudanças Climáticas no Semiárido Pernambucano: aplicabilidade do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco (SUPER). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n.03, p. 1657-1670.
- Trentin, R., Laurent, F., & de Souza Robaina, L. E. (2023). Vazão e balanço hídrico relacionado a mudanças no uso da terra em uma bacia hidrográfica de médio porte no bioma Pampa do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n. 05, p. 873.
- Tucci, C. E. M.; E Clarke, R. T. 1997. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 2, n. 1, p. 135–152.
- Vidon, P. G., Welsh, M. K., & Hassanzadeh, Y. T. 2019. Twenty years of riparian zone research (1997–2017): Where to next?. *Journal of Environmental Quality*, 48(2), 248-260.
- Upadhyay, P., Linhoss, A., Kelble, C., Ashby, S., Murphy, N., & Parajuli, P. B. 2022. Applications of the SWAT model for coastal watersheds: review and recommendations. *Journal of the ASABE*, 65(2), 453-469.
- Wang, J., Bretz, M., Dewan, M. A. A., & Delavar, M. A. 2022. Machine learning in modelling land-use and land cover-change (LULCC): Current status, challenges and prospects. *Science of The Total Environment*, 153559.
- Wagener, T.; Montanari, A. 2011. Convergence of approaches toward reducing uncertainty in predictions in ungauged basins. *Water Resources Research*, v. 47, n. 6, p. 1-8.
- Winchell, M., Srinivasan, R., DI Luzio, M., e Arnold, J. G. ArcSWAT interface for SWAT2009 User's guide. USDA Agricultural Research Service and Texas A&M Blackland Research Center, Temple, Texas. 431p. 2010.
- Woo, S. Y., Lee, J. W., Kim, Y. W., & Kim, S. J. 2020. Assessment of future stream flow and water quality of Man-gyeong river watershed based on extreme climate change scenarios and inter-basin water transfer change using SWAT. *Journal of Korea Water Resources Association*, 53(8), 605-616.
- Woo, S.-Y., Kim, S.-J., Lee, J.-W., Kim, S.-H., & Kim, Y.-W. 2021. Evaluating the impact of interbasin water transfer on water quality in the recipient river basin with SWAT. *Science of The Total Environment*, 776, 145984.
- WU, J.; CHANG, I. S. Environmental planning. In: *Environmental Management in China*. Springer, Singapore, 2020. p. 17-34.