

Uso de *Digital Twin* para avaliação do impacto de áreas degradadas na ocorrência de inundações: estudo de caso de bacia hidrográfica do rio Muriaé/Brasil

Use of Digital Twin for assessing the impact of degraded areas on flood occurrence: a case study of the Muriaé river watershed, Brazil

Larissa Carneiro Rangel¹, Jader Lugon Junior², Daniela Bogado Bastos de Oliveira³, Antônio J. Silva Neto⁴

RESUMO

A ocorrência de desastres ambientais, como as inundações, se torna mais frequente a cada dia, diante do contexto de emergência climática enfrentado pela humanidade. Cresce, também, o número de estudos referentes à interferência antrópica na paisagem que influencia no aumento da frequência de inundações, como a degradação ambiental. Faz-se importante avaliar, em uma escala macro, a relação da parte a montante e da parte a jusante de uma bacia hidrográfica, que muitas vezes abarca mais de um município, no que se refere à ocorrência de desastres ambientais. Essa questão vem a ser um desafio aos gestores públicos e impacta diretamente a população. Dessa forma, foi desenvolvido *Digital Twin* que representa uma bacia hidrográfica do rio Muriaé, utilizando a plataforma MOHID. Cinco cenários foram simulados com o objetivo de avaliar o impacto da recuperação de áreas degradadas pelo uso da terra pastagem e da recuperação de áreas de vegetação nativa na mitigação de inundações, considerando alterações na densidade do solo e no coeficiente de rugosidade. Os resultados apontam para redução no pico de vazão após essas alterações, embasando a discussão sobre a recuperação de áreas degradadas como forma de evitar, neutralizar ou reduzir o problema das inundações frequentes em questão.

Palavras-chave: Modelagem computacional. Mitigação de inundações. Degradação ambiental. Densidade do solo. Coeficiente de Manning.

ABSTRACT

The occurrence of environmental disasters, such as floods, is becoming more frequent every day due to the climate emergency faced by humanity. The number of studies on anthropogenic interference in landscapes, which influences the increased frequency of floods, such as environmental degradation, is also rising. It is crucial to assess, on a macro scale, the relationship between the upstream and downstream parts of a watershed, which often spans multiple municipalities, regarding the occurrence of environmental disasters. This issue poses a challenge for public managers and directly impacts the population. To address this, a Digital Twin representing the Muriaé River watershed was developed using the MOHID platform. Five scenarios were simulated to evaluate the impact of restoring degraded areas due to pastureland use and the recovery of native vegetation on flood mitigation, considering changes in soil density and roughness coefficient. The results indicate a reduction in peak flow after these modifications, supporting the discussion on the recovery of degraded areas as a means to prevent, neutralize, or reduce the problem of frequent floods.

Keywords: Computational Modeling. Flood Mitigation. Environmental Degradation. Soil Density. Manning's Coefficient.

¹ Doutora em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente Aplicadas em Recursos Hídricos - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense.

E-mail: larissa.rangel@iff.edu.br

Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0002-2174-1858>

² Doutor em Modelagem Computacional - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense.

E-mail: jljunior@iff.edu.br

Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0001-8030-0713>

³ Doutora em Sociologia Política - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense.

E-mail: dbogado@iff.edu.br

Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0002-5079-4561>

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica - Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

E-mail: ajsneto@iprj.uerj.br

Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0002-9616-6093>

1. INTRODUÇÃO

Diante do contexto de emergência climática, a ocorrência de desastres ambientais se torna mais recorrente. O aumento da temperatura média global não só eleva a temperatura nas cidades, mas pode tornar os eventos climáticos cada vez mais extremos em uma bacia hidrográfica (SALES, 2023). Eleva-se, então, o número de estudos referentes à interferência antrópica na paisagem que influenciam no aumento da frequência de inundações, como a urbanização e a degradação ambiental.

A ocupação irregular de áreas ribeirinhas é um dos fatores decorrentes da urbanização que pode gerar uma série de prejuízos aos moradores locais, pela obstrução dessa área destinada ao escoamento natural do rio em épocas de precipitação elevada. A preservação das margens dos rios tem importância em termos hidrológicos, geomorfológicos e ecológicos, garantindo as funções ambientais de flutuação natural dos níveis d'água; os processos de infiltração e retenção da água, favorecendo o papel de regulação hídrica; e a estabilidade das bordas do corpo d'água, evitando processos de erosão e assoreamento (MELLO, 2005).

Outra questão a ser considerada é a degradação ambiental, presente em áreas rurais, gerada por problemas de queimadas recorrentes, utilizadas como prática agropecuária para renovação de pastagens ou limpeza da terra, e pelo desmatamento associado à formação de novas áreas agrícolas e pastagens (RODRIGUES *et al.*, 2009). A degradação ambiental, como a supressão da cobertura vegetal em uma bacia hidrográfica, pode trazer consequências como a desagregação estrutural e o arrastamento de partículas do solo, iniciando-se um processo de erosão (SCALOPPI, 2015).

Essas transformações das características físicas da bacia hidrográfica, sejam acarretadas pela urbanização ou pela degradação ambiental, levam à elevação da vazão pico do hidrograma de escoamento superficial e do volume escoado superficialmente, e à redução no tempo de pico. Com isso, o sistema de macrodrenagem da bacia é sobrecarregado pelo aumento do fluxo, levando a maior frequência de inundações.

Torna-se importante avaliar, em uma escala macro, no que se refere à ocorrência de desastres ambientais, a relação da parte a montante e da parte a jusante de uma bacia hidrográfica, que muitas vezes abarca mais de um município. Todas essas questões podem levar a situações nas quais os problemas, que impactam diretamente a população, são propagados para áreas a jusante, afetando geralmente municípios vizinhos, o que se torna

um desafio para gestão pública que precisa ser integrada e articulada, considerando a Bacia Hidrográfica como unidade de planejamento.

A bacia hidrográfica escolhida como estudo de caso pertence à sub-bacia do rio Muriaé, localizada na Região Hidrográfica do Baixo Paraíba do Sul e Itabapoana (RH-IX). O rio Muriaé, um dos principais afluentes do rio Paraíba do Sul pela sua margem esquerda, nasce em Mirai/MG e possui 300 km de extensão, parte se desenvolvendo em região plana, o que contribui para a formação de planície de inundação nas grandes cheias (AGEVAP, 2017). A região analisada apresenta destaque para os quatro municípios pertencentes à região Norte e Noroeste do Estado do Rio de Janeiro que tem suas áreas urbanas cortadas pelo rio Muriaé e sofrem constantemente com inundações (Cardoso Moreira, Italva, Itaperuna e Laje do Muriaé), como pode ser observado na Fig. 1.

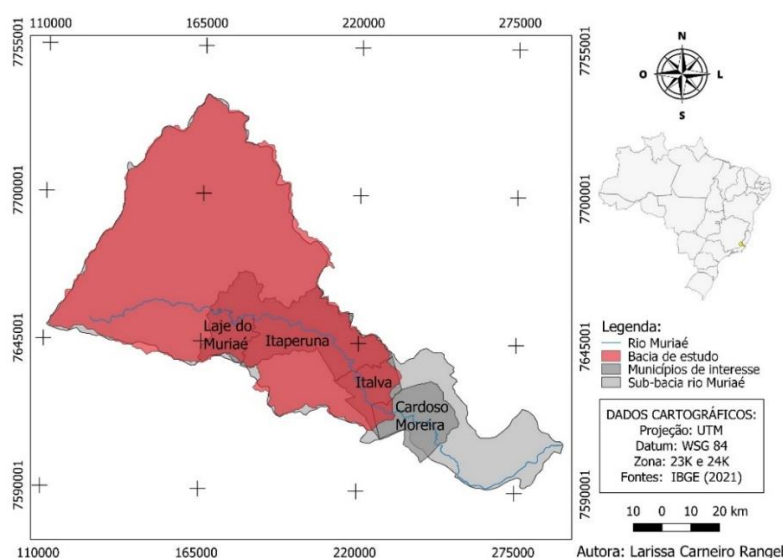


Figura 1. Localização da área de estudo.

A bacia de estudo abrange as áreas urbanas desses quatro municípios de interesse, possuindo extensão territorial de 7298km². Uma das características desses municípios é a baixa densidade demográfica, como pode ser observado na Tab.1, com base no CENSO do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística de 2022.

Tabela 1. Densidade demográfica dos municípios de estudo.

Município	População (hab)	Área territorial (km ²)	Densidade demográfica (hab/km ²)
Cardoso Moreira	12.958,00	523,00	24,80
Italva	14.073,00	291,00	48,33
Itaperuna	101.041,00	1.107,00	91,30
Laje do Muriaé	7.336,00	254,00	28,94

Fonte: IBGE, 2022.

Outra característica que a bacia de estudo apresenta é o fato de se tratar de uma região com atividade pecuária de longa data. Em um comparativo do uso e cobertura da terra nos anos de 1985 e 2022, realizado com base em dados de MapBiomas (2024), observa-se que a região não apresenta significativa alteração, sendo marcada pela predominância da pastagem em, aproximadamente, 66% da bacia hidrográfica, evidenciando o porquê de nem todas as áreas se encontrarem preservadas, o que requer uma análise crítica da legislação ambiental, especialmente do Código Florestal, instituído pela Lei nº 12.651/2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação, Áreas de Preservação Permanente (APP) e as Áreas de Reserva Legal (ARL). O mapa de uso e cobertura da terra com as porcentagens das áreas de cada uso apresentado por Rangel *et al.* (2024b), traz não só esse percentual do uso pastagem, como reforça a inexpressiva área territorial urbanizada nessa bacia, composta por menos de 1% de seu total.

Faz-se necessário, então, investigar o impacto que essa degradação pode ter na ocorrência de inundações, principalmente no que diz respeito a regiões com características semelhantes à bacia de estudo. É importante associar a legislação, o planejamento e a gestão ambiental urbana aos princípios da prevenção e da precaução, visto que evitar a incidência de danos ambientais é melhor que remediá-los.

O processo de gestão exige ferramentas computacionais, que permitam o acesso rápido aos dados da bacia hidrográfica, possibilitando a avaliação de cenários atuais e futuros de modo a analisar alternativas de implementação de medidas preventiva ou de intervenção (PORTO; PORTO, 2008).

Dessa forma, os *Digital Twin*, inicialmente utilizados na área de engenharia, passam a contribuir na esfera da ciência ambiental. Com esses modelos hidrológicos, que capturam a atual compreensão do meio, codificando em modelos matemáticos capazes de representar a estrutura desejada e o comportamento da mesma, visa-se reproduzir os cenários hipotéticos de interesse que auxiliem na escolha de medidas de redução de riscos de desastres (BLAIR, 2021).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar o impacto da recuperação de áreas degradadas pelo uso da terra pastagem e da recuperação de áreas de vegetação nativa na mitigação de inundações por meio de *Digital Twin*, levando em consideração a influência de ações impetradas em um município a montante sobre as vazões hídricas de um município a jusante. Para tanto, o estudo foi aplicado em bacia hidrográfica do rio Muriaé, utilizando a plataforma MOHID, em que cinco cenários foram simulados.

As seções seguintes descrevem o processo de validação do modelo que representa o *Digital Twin*, assim como o procedimento metodológico para realização das simulações que levaram aos resultados. Junto aos resultados, é apresentada a legislação e a discussão sobre a recuperação de áreas degradadas como forma de evitar, neutralizar ou reduzir o problema das inundações.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A validação do modelo hidrológico é fundamental para que o *Digital Twin* reproduza com boa precisão a região de estudo, permitindo a realização de simulações em cenários como os propostos neste trabalho. Para tanto, o mesmo deve passar pelo processo anterior de calibração, no qual ajustes nos valores dos parâmetros de entrada podem ser realizados para que os resultados simulados se assemelhem aos resultados observados em campo. Na validação, é executado o modelo com os valores dos parâmetros determinados na calibração para um período diferente do utilizado nessa etapa.

2.1 Validação do modelo

O modelo utilizado foi previamente validado como descrito por Rangel *et al.* (2024a). A plataforma MOHID, com interface gráfica de propriedade da Bentley, intitulada *OpenFlows FLOOD*, foi utilizada, considerando o período entre janeiro de 2012 e junho de 2012 como período de aquecimento, julho de 2012 a junho de 2013 como calibração e julho de 2013 a junho de 2015 como validação.

Os dados topográficos obtidos do TOPODATA do Instituto Brasileiro de Pesquisas Espaciais (INPE) foram interpolados com grade de malha regular com células de 500m de resolução, sendo realizada a suavização dos dados da grade e a remoção das depressões no Modelo Digital do Terreno (MDT), de forma a permitir que o terreno digital se assemelhasse ao meio físico.

Ressalta-se que a escala de uma bacia hidrográfica a ser utilizada depende da problemática e o alcance a serem abordados, podendo ser delimitada a totalidade da bacia ou suas sub-bacias, maiores ou menores (PORTO; PORTO, 2008). Para delimitação da bacia, considerou-se, então, a região a jusante da área urbana de Cardoso Moreira como seu exutório.

Após delimitação da bacia e criação da rede de drenagem, optou-se pela definição das seções transversais em função da área de contribuição. Já a precipitação foi definida

por meio de um arquivo de dados, de forma a inicializar valores variáveis no espaço e no tempo. Foram utilizados dados extraídos da *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS), que é um conjunto de dados de domínio público de precipitação quase global, de 1981 até o presente, onde são interpoladas imagens de satélite com resolução de 0,05° com dados de pluviômetros de estações para criar séries temporais de precipitação (FUNK, 2015).

Esses dados foram utilizados nos períodos em que a comparação dos resultados com as vazões observadas foi satisfatória. Porém, foram identificadas divergências nos resultados simulados em relação a dados observados que estavam relacionadas a variações entre dados de precipitação de CHIRPS e dados obtidos em estações meteorológicas monitoradas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Nesses períodos com maiores diferenças, foi realizada a correção dos valores por meio de séries temporais múltiplas, obtidas de estações meteorológicas da ANA e distribuídas ao longo da bacia com base nos Polígonos de Voronoi. Essa correção dos dados ocorreu nos meses de dezembro de 2013 e 2014 e nos meses de janeiro a junho de 2015.

Além dessas configurações, foram estabelecidas as propriedades das simulações no que diz respeito ao escoamento superficial, pela definição do coeficiente de rugosidade de Manning do canal no valor de 0,05 e da bacia em função do uso e cobertura da terra da região extraído de MapBiomass (2024), como observado na Tab. 2. Já em relação à percolação da água no solo, foi definido o valor contante constante da fração impermeável como 0,1 e o solo foi dividido em cinco camadas com as seguintes espessuras (em metros) considerando da mais profunda para a mais superficial: 2,0 - 1,0 - 0,4 - 0,3 - 0,3.

Tabela 2. Valores do coeficiente de Manning da bacia com base no uso e cobertura da terra.

Uso e cobertura da terra	Coeficiente de Manning
Corpo d'água continental	0,05
Área urbanizada	0,03
Mineração	0,09
Área descoberta	0,10
Vegetação florestal	0,30
Vegetação campestre	0,25
Silvicultura	0,28
Pastagem	0,15
Lavoura permanente	0,20
Outras áreas agropecuárias	0,20

Fonte: RANGEL *et al.*, 2024a.

A validação do modelo se deu pela comparação dos dados de vazão observados com os dados gerados nas simulações por meio dos hidrogramas extraídos dos resultados das simulações. A localização das duas estações dos municípios de interesse que a ANA disponibiliza dados de vazão, em Itaperuna e em Cardoso Moreira, serviram como nós para saída desses resultados.

Além dos hidrogramas, foram utilizadas as métricas estatísticas dos erros BIAS, *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), *Root Mean Square Error* (RMSE), e dos coeficientes de correlação de Pearson (R), coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) para validação do modelo. Com base na abordagem para interpretação dos valores do coeficiente de correção e do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe apresentados respectivamente por Schober *et al.* (2018) e Eryani *et al.* (2022), o modelo pode ser considerado com uma correlação forte e com eficiência satisfatória. Os valores para as métricas obtidos estão descritos na Tab. 3.

Tabela 3. Métricas de erros utilizadas para validação do modelo.

Simulações realizadas no MOHID Land		BIAS	MAE	MAPE	RMSE	R	R^2	NSE
Itaperuna	CHIRPS/Estações	24,86	32,25	40,89	52,11	0,83	0,69	0,48
Cardoso Moreira	CHIRPS/Estações	31,54	36,76	40,93	57,93	0,86	0,74	0,48

Fonte: RANGEL *et al.*, 2024a.

Todos arquivos utilizados para construção do MDT, para configuração dos dados de entrada e para calibração e validação do modelo foram reunidos em um banco de dados, visando auxiliar o desenvolvimento de trabalhos futuros da região. Esses dados foram compartilhados em Rangel *et al.* (2024c).

2.2 Procedimentos metodológicos

Em um primeiro momento, foram definidos os cenários de estudo que deveriam ser analisados, partindo do estado atual da bacia hidrográfica estabelecido pelo modelo validado. Os meses de novembro e dezembro de 2014 e janeiro de 2015 foram escolhidos para utilização nas simulações dos cenários propostos por serem os meses melhores representados nos hidrogramas da validação do modelo.

Sendo o intuito dos cenários avaliar o impacto da recuperação de áreas degradadas na ocorrência de inundações, foram propostas alterações nos valores do coeficiente de Manning da bacia e nas propriedades hidráulicas do solo. No que diz respeito ao coeficiente

de Manning, adotou-se as ARL, apresentadas na base de dados do SICAR, que correspondem a 12,47% do total da bacia como áreas a serem recuperadas com a utilização do valor de 0,26 nesse coeficiente de rugosidade. Dessa forma, permitiu-se representar áreas hoje ocupadas por pastagens como áreas de vegetação, considerando o mapa de uso e cobertura da terra apresentado anteriormente.

Apenas as ARL foram adotadas nesse estudo, não incluindo áreas menores, como as APP, pelo fato de a malha computacional usada na construção do MDT ter sido com células de grande dimensão que estavam em acordo com o tamanho da bacia hidrográfica. O tempo gasto pelo software para realizar as simulações está diretamente relacionado ao refinamento da malha (FIGUEIRA *et al.*, 2023). Toda uma célula de 500m de resolução sofreria alteração caso o modelo identificasse alguma dessas pequenas áreas na célula. Optou-se, então, pela adoção apenas das ARL nessa investigação.

Essas áreas consideradas degradadas podem ser tanto pela retirada de vegetação nativa ou pela degradação do solo pelo uso da terra pastagem, visto que a região de estudo apresentava mais de 70% das áreas de pastagem em estado de degradação moderada e severa no ano de 2022, como pode ser observado na Fig. 2 e na Tab. 4, que apresentam um comparativo do vigor da pastagem nessa região nos anos de 2002, 2012 e 2022.

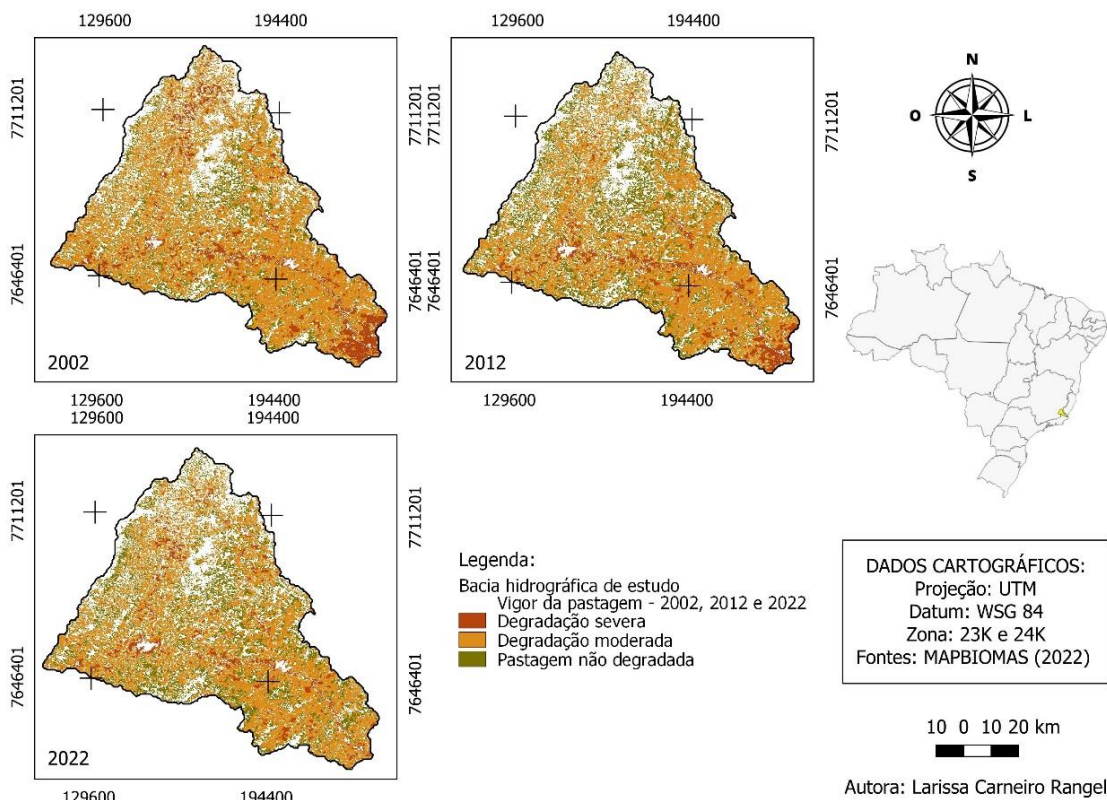


Figura 2. Mapa de vigor da pastagem nos anos 2002, 2012 e 2022.

Tabela 4. Comparativo das porcentagens das áreas de pastagem nos anos 2002, 2012 e 2022.

	2002	2012	2022
degradação severa	12,18%	8,66%	7,42%
degradação moderada	71,85%	64,55%	64,27%
não degradada	15,97%	26,78%	28,31%

Observa-se pela análise dos mapas e dos valores tabelados, o aumento nas áreas não degradadas ao longo dos anos, porém ainda com predominância de pastagens com algum grau de degradação. Áreas de pastagem, quase que em monocultivo, com solos de baixa fertilidade e com manejo inadequado apresentam grande risco de sofrer acelerado processo de degradação. Torna-se, ainda, importante frisar que após a recuperação ou renovação da pastagem é necessário que sejam adotadas práticas de manejo apropriadas para cada forrageira, bem como o manejo animal adequado, de forma a quebrar o ciclo vicioso da degradação (MACEDO *et al.*, 2013).

Nesse aspecto, foi considerada, nas simulações, a alteração das propriedades hidráulicas do solo, dadas pela porcentagem de areia, silte e argila e pela densidade do solo, nessas áreas de pastagem apresentadas com grau de degradação moderada e severa. Por se tratar de recuperação de pastagens degradadas, adotou-se a alteração da densidade do solo, visto que a degradação dessas áreas diminui a cobertura do solo, deixando-o exposto à chuva e ao processo de compactação pelo pisoteio do gado, resultando em aumento da densidade do solo na camada superficial e diminuição do grau de floculação da argila e da porosidade total (MULLER *et al.*, 2001).

Duas alternativas de redução da densidade foram analisadas, visando simular a melhoria na característica do solo. Foram alteradas apenas as duas primeiras camadas do solo. Em um cenário, foi considerada uma redução de 10% da densidade do solo na primeira camada e de 5% na segunda. Já em outro cenário, foi atribuída uma redução de 20% da densidade na primeira camada e de 10% na segunda. Foi utilizada, então, a ferramenta Rosetta (HANDBOOK60, 2023) para estimar as propriedades hidráulicas do solo a partir da característica de cada solo da região. Os tipos de solo da região foram identificados por meio do mapa de solos disponibilizado pela EMBRAPA (2011).

Outra questão que se objetivou analisar foi a influência da parte alta da bacia nos municípios de interesse, pertencentes à parte baixa. Definiu-se, nesse sentido, a altitude de 350m como divisor dessas duas partes. Dessa forma, foram alterados os valores do coeficiente de Manning e as propriedades hidráulicas do solo apenas na parte com altitude

acima de 350m em dois dos cenários, de forma a verificar a alteração na vazão em relação aos outros dois cenários em que toda a bacia sofreu alteração. A parte alta da bacia apresenta 4297Km², correspondendo a 58,88% do total da bacia hidrográfica, e pode ser observada pela cor vermelha no MDT da Fig. 3.

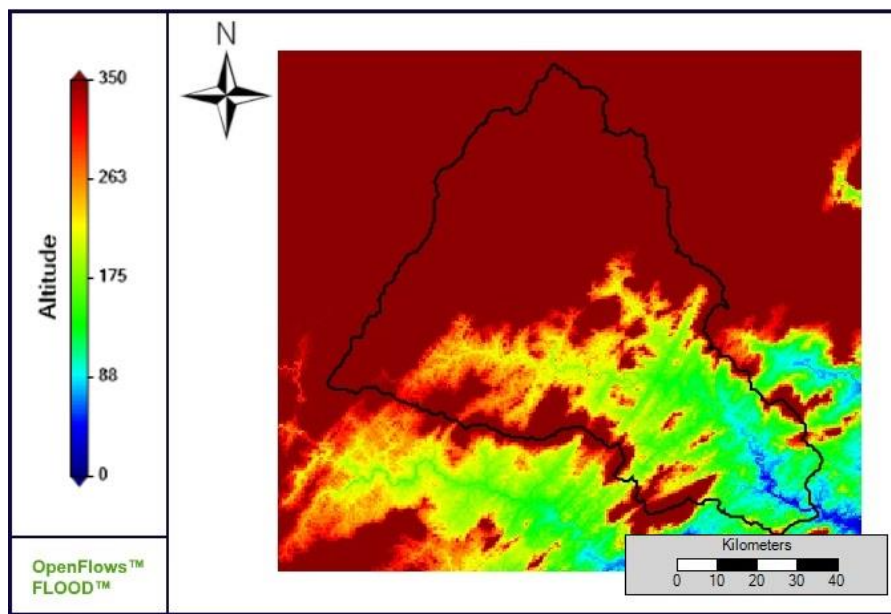


Figura 3. Modelo Digital do Terreno definido pelo limite de 350m de altitude.

O Quadro 1 resume os cenários propostos considerando a análise das alterações tanto na bacia toda, quanto apenas na sua parte com altitude acima de 350m. O primeiro cenário representando o estado atual da bacia serviu como parâmetro para avaliação dos resultados das simulações dos demais cenários. Os resultados dessas simulações serão apresentados, na seção seguinte, junto à discussão dos mesmos no que tange à temática desse trabalho.

Quadro 1. Definição dos cenários.

Cenário 1	Simulação do estado atual da bacia hidrográfica
Cenário 2	Recuperação de áreas degradadas em toda bacia hidrográfica (alteração nos valores do coeficiente de Manning da bacia e redução de 10% da densidade do solo na primeira camada e de 5% na segunda camada)
Cenário 3	Recuperação de áreas degradadas em toda bacia hidrográfica (alteração nos valores do coeficiente de Manning da bacia e redução de 20% da densidade do solo na primeira camada e de 10% na segunda camada)
Cenário 4	Recuperação de áreas degradadas na parte alta bacia hidrográfica (alteração nos valores do coeficiente de Manning da bacia e redução de 10% da densidade do solo na primeira camada e de 5% na segunda camada)
Cenário 5	Recuperação de áreas degradadas na parte alta bacia hidrográfica (alteração nos valores do coeficiente de Manning da bacia e redução de 20% da densidade do solo na primeira camada e de 10% na segunda camada)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações propostas geraram resultados para os municípios de Itaperuna/RJ e Cardoso Moreira/RJ que permitiram a elaboração dos hidrogramas apresentados a seguir na Fig. 4. Nesses hidrogramas, é possível observar que a recuperação das áreas degradadas, representadas nesses cenários pela alteração do coeficiente de rugosidade e da densidade do solo, permitiu uma redução dos picos de vazão, além de garantir o aumento da vazão de base, que constitui um aspecto positivo ambientalmente e pela perenidade do rio.

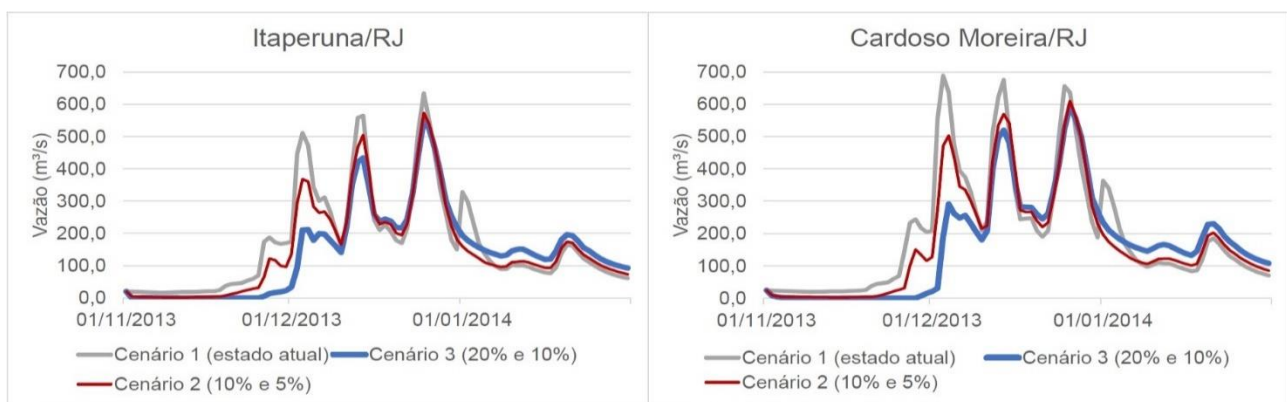


Figura 4. Hidrogramas das simulações nos cenários 1, 2 e 3.

Entende-se que, assim como o processo de degradação da pastagem é um processo contínuo e em vários estágios de perda de vigor da planta forrageira em função de seu manejo inadequado, o processo de restauração de cobertura vegetal, também, é progressivo (MACEDO *et al.*, 2013). Dessa forma, esse processo estaria sendo representado, passando por um primeiro estágio referente ao cenário 2, com menor redução da densidade, podendo alcançar, em estágio seguinte, uma densidade conforme a representada no cenário 3. Essas melhorias gradativas no solo levariam a minimização dos impactos oriundos das precipitações elevadas.

Os cenários 4 e 5 foram elaborados para verificar a influência que a parte da bacia com altitude mais elevada apresenta sobre os municípios de interesse, pertencentes à parte baixa da bacia e que sofrem, frequentemente, com inundações. Esses resultados apresentaram hidrograma muito próximos aos anteriores, referentes aos cenários com alterações na bacia toda, sem variações significativas entre si, confirmando a hipótese de que a parte alta influencia de forma notória as ondas de cheia da região de estudo.

Essa questão reforça a necessidade do aperfeiçoamento da gestão de recursos hídricos de forma integrada e não limitada aos limites territoriais, favorecendo as tomadas de decisão. O recorte geográfico, no Brasil, por ser extenso, gera dificuldades na gestão, uma vez que os recursos hídricos exigem a gestão compartilhada, numa perspectiva intersetorial, com a administração pública, o(s) Comitê(s) de Bacia Hidrográfica (CBH), os órgãos ambientais e de saneamento, as instituições ligadas à atividade agropecuária, entre outros. Contudo, cada um desses setores tem uma divisão administrativa normalmente distinta da bacia hidrográfica. Os CBH têm, dentre suas obrigações, o papel de articulação entre os diversos agentes envolvidos, porém há muito ainda no que se avançar pela integração da gestão democrática, que se dará quando a decisão tomada e implantada contemplar os múltiplos aspectos da gestão das águas, de forma participativa (PORTO; PORTO, 2008).

Importante considerar, na análise dos resultados desse estudo, que o período analisado apresenta três picos de vazão em um intervalo de, aproximadamente, dez dias entre cada um deles, o que se torna um intervalo curto para a água percolar no solo, acarretando um resultado de melhoria menos expressiva nos picos 2 e 3. Por não se tratar de um evento de precipitação isolado, o solo acaba por ficar saturado, diminuindo o efeito de redução na vazão nos eventos seguintes. Esse percentual de redução em cada um dos picos está detalhado na Tab. 5 de acordo com o resultado dos cenários propostos.

Tabela 5. Redução dos picos de vazão de acordo com cada cenário.

	Itaperuna/RJ			Cardoso Moreira/RJ		
	Pico 1	Pico 2	Pico 3	Pico 1	Pico 2	Pico 3
Cenário 2 (10% e 5% - toda bacia)	29,14%	9,78%	12,14%	27,95%	16,43%	8,57%
Cenário 3 (20% e 10% - toda bacia)	60,09%	22,29%	15,54%	58,54%	23,57%	6,94%
Cenário 4 (10% e 5% - parte alta)	28,00%	10,61%	9,52%	26,89%	15,64%	10,98%
Cenário 5 (20% e 10% - parte alta)	58,76%	23,13%	13,22%	57,63%	22,96%	9,41%

Nota: Atraso de um dia em relação ao estado atual nos Picos 1 e 3 no município de Cardoso Moreira/RJ.

Pela observação da tabela, pode-se dizer que, em um caso de uma precipitação isolada, como no Pico 1, a redução do pico seria de, aproximadamente, 28% nos casos iniciais de recuperação das áreas degradadas (cenários 2 e 4) e de, aproximadamente, 59% em um cenário de recuperação mais completa (cenários 3 e 5). Pode-se, ainda, constatar que, mesmo em casos de precipitações seguidas, como no Pico 3, é percebida uma redução de pelo menos, aproximadamente, 10% no pico de vazão.

Além da redução dos picos de vazão, as alterações propostas trouxeram o benefício de atraso no tempo do pico no município a jusante da bacia, Cardoso Moreira/RJ. Esse atraso permite que o reflexo de precipitações na parte alta da bacia seja percebido com um intervalo maior para que medidas de prevenção possíveis possam ser tomadas.

Saliente-se que o Direito Ambiental se pauta nos princípios da prevenção e da precaução. Entretanto, é necessária uma análise sistemática e crítica da tentativa de flexibilização da legislação ambiental.

Os marcos legais, importantes instrumentos jurídicos para auxiliar a gestão ambiental, às vezes geram ambiguidade quanto ao cumprimento das medidas de prevenção e preservação. Em 2021, a atualização da Lei nº 12.651/2012, é um exemplo. Nessa alteração do art. 4º, § 10, do Código Florestal em análise, realizada pela Lei nº 14.285/2021, abriu-se uma brecha problemática para minimizar as faixas marginais estabelecidas em áreas urbanas consolidadas, pois as APP podem ser redefinidas por leis municipais, de forma distinta do que estabelecidas no art. 4º, inciso I do próprio Código Florestal. Daí, essencial bom senso e a compreensão da principiologia protetiva do Direito Ambiental que veda retrocessos e preza pelo mínimo existencial ecológico, ratificando a importância dos municípios evitarem desconsiderar o mínimo exigido, como regra, na Lei federal, que serve como parâmetro protetivo (afinal, o ideal é o Município, de acordo com suas especificidades locais, ser mais restritivo); de se envolver os conselhos estadual e municipais de meio ambiente para se caracterizar a gestão participativa; de se respeitar a não ocupação de áreas com risco de desastres, bem como de se observar as diretrizes do plano de recursos hídricos, do plano de bacia, do plano de drenagem e/ou do plano de saneamento básico, o que reforça a relevância da atuação do(s) CBH e dos municípios terem Planos Diretores com forte dimensão ambiental, sinalizando os instrumentos de gestão urbana ambiental.

Outrossim, outro ponto crítico do novo Código Florestal, é com relação à recuperação de áreas degradadas, porque as áreas rurais consolidadas até 22 de julho de 2008 ficaram autorizadas à continuidade das atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural em suas APP, sem obrigatoriedade de recomposição. Já nos demais imóveis rurais com APP, posteriormente consolidados, deve ser realizada a recomposição de toda faixa marginal apenas nos imóveis com área superior a quatro Módulos Fiscais (MF). Mas, em áreas menores do que quatro MF, a recomposição da APP varia de 5 a 15 m. Já em relação às ARL, os imóveis rurais com área de até quatro MF em 22 de julho de 2008, têm essas ARL constituídas pela área ocupada com vegetação nativa existente nesta data, ficando

dispensados de promover a recomposição, compensação ou regeneração das áreas percentuais de vegetação nativa que estivessem em acordo com a legislação anterior.

Importante observar que, essa recomendação do Código Florestal, em algumas regiões como a escolhida para análise nesse estudo, torna-se ineficiente por apresentar a maior parte dos imóveis com área menor que quatro MF. A bacia hidrográfica de estudo, pertencente à sub-bacia do rio Muriaé, apresenta a maioria dos imóveis rurais¹ com área menor que a estipulada como limite para recomposição total das áreas de vegetação.

Contudo, o próprio Código Florestal, em seu art. 3º, X, j-A, incluído pela Lei nº 14.653, de 2023, reforça a importância das atividades eventuais ou de baixo impacto ambiental, definidas justamente como as atividades com o objetivo de recompor a vegetação nativa no entorno de nascentes ou outras áreas degradadas. A sensibilização de proprietários rurais quanto a isso, de modo que propriedades rurais cumpram sua função socioambiental, é imprescindível para conservação ambiental e gestão das águas de forma integrada com o planejamento urbano.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Buscar estratégias de adaptação às mudanças climáticas, que vêm contribuindo para o aumento da frequência de eventos extremos de precipitação e de desastres ambientais, como as inundações, passa a ser foco de estudos referentes à interferência antrópica na paisagem. O *Digital Twin* torna-se importante ferramenta de planejamento e gestão ao reproduzir cenários hipotéticos de interesse que auxiliem na escolha de medidas de redução de riscos de desastres.

Neste trabalho, esse modelo computacional foi utilizado para verificar a hipótese de que regiões com característica de predominância do uso da terra pastagem podem ter suas áreas degradadas como fator determinante para o aumento da vazão do rio. Além disso, buscou-se identificar a influência da parte a montante da bacia sobre a parte a jusante.

Os resultados do estudo mostraram que, em um primeiro processo de recuperação das áreas degradadas, os picos podem ser reduzidos em, aproximadamente, 28% e, em um segundo momento, poderiam ser reduzidos em, aproximadamente, 59%. Esses resultados confirmam a hipótese levantada, não deixando de considerar que, em casos de

¹Esses dados podem ser obtidos no Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR), que é um registro eletrônico obrigatório para todos os imóveis rurais com o intuito de criar uma base de dados estratégica para o controle, monitoramento e combate ao desmatamento das florestas e demais formas de vegetação nativa do Brasil. Nele é disponibilizado o número de imóveis rurais cadastrados por município.

eventos de precipitação seguidos, o solo fica saturado, dificultando a percolação da água no mesmo e, conseqüentemente, não apresentando o mesmo comportamento na vazão do rio nos eventos seguintes.

É importante notar que a influência da parte da bacia hidrográfica com altitude mais elevada sobre a parte a jusante acaba por trazer um desafio aos gestores públicos por se tratar em alguns casos, como o da região de estudo, de uma bacia que abarca mais de um município. Essa situação que transpõe os limites municipais, sem discussão de forma macro, leva a conseqüências que impactam diretamente a população. Assim, o desenvolvimento de estudos com recortes no âmbito de bacia hidrográfica subsidia o debate a respeito do aperfeiçoamento ainda necessário na legislação ambiental para fortalecê-la dentro da exegese *in dubio pro ambiente*, bem como no sistema descentralizado, democrático e participativo da gestão dos recursos hídricos que subsidia decisões relacionadas a políticas públicas nas áreas urbana e rural de cada município.

Dessa forma, pensar essas estratégias para evitar, neutralizar ou reduzir o problema das inundações frequentes em várias cidades, com suporte da modelagem computacional, torna-se relevante, principalmente no que tange ao desenvolvimento sustentável, como a recuperação de áreas degradadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AGEVAP. Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Relatório de Situação da Região Hidrográfica do Baixo Paraíba do Sul e Itabapoana**. Rio de Janeiro, 2017.

BLAIR, G. S. Digital twins of the natural environment. **Patterns** 2, v. 2, 2021.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Brasília, DF: Presidência da República, 2012a.

BRASIL. **Decreto nº 7.830, de 17 de outubro de 2012**. Dispõe sobre o Sistema de Cadastro Ambiental Rural. Brasília, DF: Presidência da República, 2012b.

BRASIL. **Lei nº 14.285, de 29 de dezembro de 2021**. Altera a Lei nº 12.651, de 25 de maio

de 2012. Brasília, DF: Presidência da República, 2021.

EMBRAPA. **Mapa de Solos do Brasil**. 2011. Disponível em: https://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil_solos_5m_20201104. Acesso em: 10 jun. 2024.

ERYANI, I G. A. P.; JAYANTARI, M. W., WIJAYA, I K. M. Sensitivity Analysis in Parameter Calibration of the WEAP Model for Integrated Water Resources Management in Unda Watershed. **Civil Engineering and Architecture**, v. 10, n. 2, p. 455-469, 2022.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes. **Nature - Scientific Data**, 2015.

HANDBOOK60. **Rosetta**. Disponível em: <<https://www.handbook60.org/rosetta/>> Acesso em: 15 jun. 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2022**. Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>>. Acesso em: 25 jun. 2024.

MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H.; KICHEL, A. N.; ALMEIDA, R. G.; ARAUJO, A. R. **Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação**. In: Encontro de adubação de pastagens da Scot Consultoria - Tec - Fértil, 1., 2013, Ribeirão Preto, SP. Bebedouro: Scot Consultoria, p. 158-181, 2013.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomass – Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 01 mai de 2024.

MELLO, S. S. As funções ambientais e as funções de urbanidade em margens de cursos d'água. **Oculum Ensaio Revista de Arquitetura e Urbanismo**, Campinas, v.4, 2005, p.49-61.

MULLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. F.; DESJARDINS, T.; MARTINS, P. F. S. Degradação de pastagens na Região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1409-1418, nov. 2001.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.

RANGEL, L. C.; LUGON JUNIOR, J.; SILVA NETO, A. J. Development of Digital Twin for the Muriaé river watershed/Brazil. **Revista Cereus**, v. 16, n. 3, p. 449-464, out. 2024a.

RANGEL, L. C.; LUGON JUNIOR, J.; SILVA NETO, A. J. Instrumentos de planejamento e gestão urbana para mitigação de inundações: Estudo de caso dos municípios fluminenses ao longo do rio Muriaé. **Revista Política e Planejamento Regional**. Rio de Janeiro – vol. 11, nº 2, maio – agosto de 2024, p. 181 – 203, 2024b.

RANGEL, L. C.; LUGON JUNIOR, J.; SILVA NETO, A. J. **Sub-bacia do rio Muriaé**. HydroShare, 2024. Disponível em: <<http://www.hydroshare.org/resource/dbcfe2e94d994a86bab8290dd303f21a>>. Acesso em: 05 out. 2024c.

RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; ISERNHAGEN, I. [Org.]. **Pacto pela restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo: LERF/ESALQ: Instituto Bioatlântica, 2009.

SALES, C. B. Governança Ambiental e Gestão de Riscos e de Desastres (GRD): avanços e desafios da agenda de adaptação em nível local no Brasil. **Revista Política e Planejamento Regional**, v. 10, n. 2, p. 104 – 122, mai./ago. 2023.

FIGUEIRA, S. O. S.; J. P., T.; V. N. B., M.; R. T., W. Análise da influência da malha computacional na simulação do rompimento de uma barragem por meio do software IBER. Estudo de caso: barragem de Barra do Braúna. **Revista Cereus**, v. 15, n. 4, p. 125-140, 22 dez. 2023.

SCALOPPI, E. J.; GARCIA, C. J. B. Dimensionamento simplificado de terraços para conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. Fortaleza, v.9, nº.6, p.340 -348, 2015.

SCHOBER, P.; BOER, C.; SCHWARTE, L. A. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. **Anesthesia & Analgesia**, v. 126, n. 5, p. 1763-1768, 2018.