



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

MARYANNA H. D MONTEIRO

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA ASSOCIADA
À ÍNDICES DE PRECIPITAÇÃO E USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NO ALTO DO
CURSO DO RIO MACAÉ, SUB-BACIA GALDINÓPOLIS**

Prof. Dr. Marcel Carvalho Abreu
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
julho – 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

MARYANNA H. D MONTEIRO

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA ASSOCIADA
À ÍNDICES DE PRECIPITAÇÃO E USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NO ALTO DO
CURSO DO RIO MACAÉ, SUB-BACIA GALDINÓPOLIS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. Marcel Carvalho Abreu
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
julho – 2024

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA ASSOCIADA
À ÍNDICES DE PRECIPITAÇÃO E USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NO ALTO DO
CURSO DO RIO MACAÉ, SUB-BACIA GALDINÓPOLIS**

MARYANNA H. D MONTEIRO

APROVADA EM: 19/07/2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcel Carvalho Abreu – UFRRJ
Orientador

Prof. Dr. Bruno Araújo Furtado de Mendonça – UFRRJ
Membro

Dr. Micael de Souza Fraga – Instituto Mineiro de Gestão das Águas
Membro

Dedico essa monografia às minhas mães
Rosangela Maria e Denise Cavalcante.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, por todo conhecimento que adquiri durante o período de graduação e todas as oportunidades de crescer como profissional e como ser pensante nesse mundo. Agradeço ao professor Marcel Carvalho Abreu por aceitar fazer a minha orientação de forma tão atenciosa e enriquecedora.

Também à banca examinadora que se dispôs a estar presente, e que pra mim são profissionais que excelentes, é um privilégio tê-los neste trabalho.

Um profundo agradecimento ao Laboratório de Modelagem Atmosférica e Ambiental GMAAT, o qual me proporcionou um espaço e apoio para fazer essa pesquisa e conhecer outros pesquisadores tão incríveis.

Agradeço imensamente aos meus professores da Escola Estadual José Maria da Costa, escola da rede pública numa cidade rural do Rio de Janeiro, mas com professores incríveis e tão comprometidos com a educação e o meio ambiente, que não se limitavam só às salas de aulas, sempre inovando com projetos e abrindo a porta para tanta inspiração.

Agradeço a minha família toda, minha irmã e minha segunda mãe Denise, em especial à minha saudosa mãe Rosângela que sempre viu na educação o caminho mais bonito, que ela não pode fazer de forma acadêmica, mas que na construção da vida aprendeu até mais e foi professora em todo o tempo que esteve aqui. A ela toda a minha vida.

Um agradecimento especial a todos os meus amigos que sempre me apoiaram e ajudaram nessa caminhada. Agradeço ao Tom Adnet e Pedro Adnet pela inspiração e empurrão para estar aqui trilhando esse caminho lindo da Engenharia Florestal. Em especial minha amiga de jornada Monique, que me acompanha em todas as fases e veio para a Rural junto acreditar num mundo mais verde.

Ao quarto 103 todo meu amor, sem elas eu não teria ido tão longe, obrigada por fazerem parte da minha vida!

Agradeço a família dos meus amigos que são minha família também, e que sem eles seria tão mais difícil de ser quem eu sou.

Por fim agradeço a meu pai, por me apoiar e acreditar no meu potencial sempre.

RESUMO

Mudanças no comportamento de precipitação e no uso e ocupação da terra alteram a disponibilidade hídrica de bacias hidrográficas, tornando importante a análise dessas variáveis no tempo e espaço. Assim, a pesquisa tem como intuito realizar uma análise acerca da variação espaço-temporal da disponibilidade hídrica, dinâmica do uso e ocupação do solo e padrões de precipitação na sub-bacia do alto curso do Rio Macaé, sub-bacia de Galdinópolis. A bacia do rio Macaé foi escolhida para estudo devido à sua grande relevância dentro do estado do Rio de Janeiro, por ser a bacia de maior extensão, com uma área de drenagem de aproximadamente 1765 km², e por abastecer com tanta abundância a Cidade do Petróleo (município de Macaé), tornando a conservação desse recurso tarefa de todos. A cabeceira do Rio Macaé está inserida dentro do corredor central da mata atlântica no estado do Rio de Janeiro, fazendo parte da área de proteção ambiental de Macaé de Cima (APAEMC). O trabalho foi construído a partir de informações públicas da Região Hidrográfica VIII do estado do Rio de Janeiro, em área de influência delimitada a partir da estação fluviométrica da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) de código 59120000 (Galdinópolis). Para tal, séries temporais de precipitação e vazões disponibilizadas no portal HidroWeb, gerenciado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) Dados diários de vazões das estações 59125000 e 59120000 entre 1972 e 2023 foram coletados e, a partir desses dados, séries anuais de vazões máximas (Q_{max}), médias (Q_{med}) e mínimas de sete dias consecutivos (Q_{min}) foram geradas. Dados de precipitação diária das estações Galdinópolis e Macaé de Cima foram coletados e séries anuais dos totais precipitados e do número de dias com chuva foram obtidos entre 1951 e 2023. Os dados de uso e ocupação do solo em série anual, que vai de 1985-2021, correspondente às áreas (ha) das classes: Formação Florestal, Mosaico de Usos, Pastagem e Silvicultura. Os dados foram trabalhados no software R para as análises de tendências temporais pelos testes não paramétricos de Pettit e Mann-kandall, à 5% de probabilidade do erro e análise de correlação. Foram encontradas tendencias significativas para todas as classes de uso e ocupação da terra, em que há aumento em área de formação florestal e silvicultura e redução de pastagens e mosaico de usos. A precipitação apresentou tendência de redução no total precipitado anual na estação 2242003. Outro ponto de destaque foi a tendência significativa de redução no número de dias de chuva na estação 2242004, com uma taxa de decréscimo de 0,64 dias por ano. As vazões apresentaram tendências na estação 59120000 (Galdinópolis), de redução significativa na vazão mínima (Q_{min}) de -0,0953 m³/s por ano, indicando uma possível diminuição na disponibilidade hídrica. O cenário observado foi o de diminuição de vazão mínima em uma das estações bem como dias de chuva e área de pastagem e mosaico de usos, também houve diminuição das médias do total precipitado, o que pode indicar relação com as mudanças climáticas.

Palavras-chave: Tendências temporais; Vazão; Rio Macaé; Manejo de Bacias; Precipitação; Gestão de recursos hídricos

ABSTRACT

Changes in precipitation behavior and land use and occupation alter the water availability of watersheds, making it important to analyze these variables in time and space. The research aims to conduct an analysis of the space-time variation of water availability, dynamics of land use and occupation and precipitation patterns in the sub-basin of Galdinópolis in the upper course of the Macaé River. The Macaé River basin has great relevance within the state of Rio de Janeiro, it's the basin with the greater extent, with a drainage area of approximately 1765 km², and for supplying the City of Petroleum (County of Macaé) with such abundance, making the conservation of this resource a task for all. The headwaters of the Macaé River is inserted within the central corridor of the Atlantic Forest in the state of Rio de Janeiro, being part of the environmental protection area of Macaé de Cima (APAEMC). The work was built with public information from the Hydrographic Region VIII of the state of Rio de Janeiro, in an area of influence delimited from the fluviometric station 59120000 (Galdinópolis). The data was collected, time series of precipitation and flows available by the National Water Agency (ANA) on the HidroWeb portal and land use and occupation classes available on the MapBiomias portal. Daily flow data from stations 59125000 and 59120000 between 1972 and 2023 was collected and, from this data, annual series of maximum (Q_{max}), average (Q_{med}) and minimum flows of seven consecutive days (Q_{min}) were generated. Daily precipitation data from the 2242004 and 2242003 stations was collected and annual series of total precipitation and the number of days with rain were obtained between 1951 and 2023. Land use and occupation data was obtained from the MAPBIOMAS website, in an annual series from 1985-2021, corresponding to the areas (ha) of the classes: Forest Formation, Mosaic of Uses, Pasture and Silviculture. The data was processed in the Rstudio software for the analysis of temporal trends by the non-parametric tests of Pettit and Mann-kandall, at 5% probability of error and correlation analysis. Significant trend was found for all classes of land use and occupation, in which there is an increase on the area of forest formation and silviculture and a reduction in pastures and mosaic uses. Precipitation showed an annual downward trend in the 2242003 season. Another highlight was the significant trend of reduction in the number of rainy days in the 2242004 season, with a decrease rate of 0.64 days per year. The flows showed a trend at station 59120000 (Galdinópolis) of a significant reduction in the minimum flow (Q_{min}) of -0.0953 m³/s per year, indicating a possible decrease in water availability. Is expected that this work can contribute to a better understanding of the water scenario of this region and can help in the management of water resources in the Macaé River basin.

Keywords: Temporal trends; Flow; Macaé River; Basin Management; Precipitation; Water resources management

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	02
2.1 Vazões de referência.....	03
2.2 Influência da precipitação nas vazões.....	04
3.1 Influência do uso e ocupação do solo nas vazões.....	05
3. BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MACAÉ.....	06
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	09
4.1 Área de Estudo.....	09
4.2 Vazão.....	12
4.3 Precipitação.....	12
4.4 Uso e Ocupação do Solo.....	12
4.5 Análises Estatísticas.....	13
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	14
6. CONCLUSÃO.....	18
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20

1. INTRODUÇÃO

A preservação e a boa gestão dos recursos hídricos são essenciais para o Brasil, que possui um grande volume desses recursos, embora finitos. A gestão inadequada pode comprometer a disponibilidade e a qualidade da água, impactando diversos setores econômicos e a vida das populações (SANTOS, CARVALHO e MARTINS, 2023). As mudanças climáticas são influenciadas pelas atividades humanas associadas à emissão de gases de efeito estufa e afetam os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica (DE MELLO ET AL., 2009), de acordo com HULME & SHEARD (1999), é de se esperar que as alterações no regime de precipitação tenham implicações no regime de escoamento dos rios brasileiros, embora não exista tendência bem definida para o aumento ou a redução da vazão (ALVARENGA et al., 2023). Logo, o estudo em bacias hidrográficas e seu comportamento ao longo das mudanças de uso do solo e regime de precipitação se mostra como estratégia na mitigação dos efeitos às mudanças climáticas.

Nesse contexto, a Bacia do Rio Macaé, situada na faixa costeira central-norte do estado do Rio de Janeiro, destaca-se pela riqueza em recursos naturais. Localizada entre as regiões hidrográficas do Baixo Paraíba do Sul e do Rio São João e Lagos, essa bacia é de grande interesse para diferentes setores sociais e econômicos, devido à sua localização estratégica e diversidade ambiental (INEA, 2016).

A bacia abrange os municípios de Rio das Ostras e Macaé, além de partes de Nova Friburgo, Casimiro de Abreu, Conceição de Macabu e Carapebus, totalizando uma área de 1.978 km². Com isso, essa região se tornou foco de estudos ambientais voltados para a preservação e reabilitação de seus recursos. Entretanto, há outros setores que também se mostram interessados, como a PETROBRÁS, que utiliza as águas da bacia para abastecer suas plataformas; a Usina Termelétrica do Norte Fluminense (UTE), que utiliza a água para o resfriamento das caldeiras; e a Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE), responsável pelo abastecimento hídrico na região. Além disso, os agricultores, piscicultores (LAZZAROTTO & CARAMASCHI, 2009) e empreendedores locais também dependem desse recurso. Segundo Villas Boas et al. (2023), a conservação da Bacia do Rio Macaé é crucial não apenas para suprir água às indústrias e à agricultura, mas também para assegurar a sustentabilidade e a qualidade de vida das comunidades que dela dependem.

A região serrana do estado do Rio de Janeiro abriga os principais remanescentes florestais do estado, em grande parte devido à acentuada declividade das montanhas, que,

inicialmente, dificultou uma ocupação humana intensa, contribuindo para a preservação parcial da Mata Atlântica (MARÇAL *et al.*, 2004).

A Mata Atlântica, um dos biomas mais ricos em biodiversidade do mundo, desempenha um papel crucial na conservação dos recursos hídricos e é um *hotspots* de biodiversidade, além disso abriga grandes centros urbanos, com população aproximada de 125 milhões de pessoas e conter regiões industrializadas, grandes empreendimentos agrícolas e produzir 70% do Produto Interno Bruto (REZENDE *et al.*, 2018). A preservação das florestas e matas ciliares é vital para manter a qualidade e a quantidade de água, além de contribuir para a regulação climática e a proteção do solo contra a erosão (SILVA *et al.*, 2012).

A mudança no uso e ocupação da terra, devido à conversão de áreas naturais em áreas produtivas, e as mudanças climáticas têm sido relatada como os principais propulsores na modificação da disponibilidade hídrica (BOGALE *et al.*, 2024; M'BAREK *et al.*, 2024; NUÑEZ *et al.*, 2024), que pode ser representada pelas vazões de referência. A vazão máxima (Q_{max}) representa o maior volume de água que escoar através de uma seção transversal de um rio ou canal em um determinado período. Este valor é crítico para o planejamento de estruturas hidráulicas, controle de enchentes e gestão de recursos hídricos, pois indica a capacidade máxima de transporte de água em situações extremas, como durante tempestades intensas ou períodos de grandes chuvas, já a vazão média (Q_{med}) representa o volume de água que escoar, em média, através de uma seção transversal de um rio ou canal ao longo de um determinado período, geralmente calculado em base diária, mensal ou anual. Este valor fornece uma visão geral das condições hídricas de uma bacia ao longo do tempo e é crucial para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. A vazão mínima e 7 dias consecutivos, frequentemente indicada como Q_7 , é uma medida utilizada para avaliar o menor volume de água que passa por uma seção transversal de um rio durante o período mais seco de sete dias consecutivos em um intervalo estabelecido, neste caso foi de 1 ano para cada série. Este índice é fundamental para determinar a capacidade mínima de suporte de um corpo d'água, especialmente em relação à manutenção de ecossistemas aquáticos e ao suprimento de água em períodos de estiagem. A vazão mínima de sete dias consecutivos (Q_{min}) é uma das mais utilizadas na representação das vazões mínimas (ABREU *et al.*, 2022). Portanto, a disponibilidade hídrica representada pelas vazões, sofre interferência direta da precipitação, número de dias de chuva e da condição de uso e ocupação da terra, sendo necessário uma análise multifacetada para detectar possíveis relações.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O estudo do comportamento espacial de um determinado elemento climático, como a precipitação, é fundamental para o gerenciamento dos recursos hídricos (SILVA *et al.*, 2020),

A análise das tendências climáticas nos registros de caudais é fundamental para compreender as mudanças hidrológicas em uma bacia (PENNEREIRO, MARTINS & BERETTA, 2015). Este estudo investigou as variações sazonais nos regimes climático e hidrológico da Bacia dos Rios Tocantins e Araguaia, e viu como os padrões de precipitação e as vazões dos rios estão evoluindo ao longo do tempo. A exemplo, o uso intensivo do solo na região de Marinópolis, SP, tem resultado em uma significativa redução dos fluxos hídricos do Córrego Três Barras (PRADO *et al.*, 2022). Resultando em menor infiltração de água no solo e maior escoamento superficial, fatores que intensificam a erosão e o assoreamento dos corpos d'água. Essa mudança no uso do solo afeta a disponibilidade hídrica, e a qualidade da água (PRADO *et al.*, 2022). Analogamente, na Bacia do Rio Macaé, essas tendências podem ser observadas, especialmente em áreas de uso misto e pastagem.

A variabilidade climática em escalas regionais e globais pode gerar impactos significativos sobre o regime hidrológico, incluindo degradação da qualidade da água, deterioração dos ecossistemas, aumento da erosão, secas e enchentes (PENNEREIRO, MARTINS E BERETTA, 2023; MEEHL ET AL., 2007; TOLEDO, 2013; IPCC, 2014). De acordo com o 4º e 5º Relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que analisaram dados a partir da década de 1970, foram observadas alterações expressivas nos parâmetros climáticos. Os relatórios indicam, com mais de 90% de certeza, que uma porção das variações climáticas em várias regiões do planeta é resultado do aquecimento global que a Terra vem experimentando nas últimas décadas (PENNEREIRO, MARTINS E BERETTA, 2023; MEEHL ET AL., 2007; TOLEDO, 2013; IPCC, 2014).

A conservação da bacia hidrográfica é fundamental para a manutenção da quantidade e qualidade da água. No contexto da Bacia do Rio Macaé, é enfatizada a importância da preservação das áreas de cabeceira para garantir a segurança hídrica a jusante. A diminuição das áreas de pastagem e mosaico de usos, observada entre 1985 e 2022, pode contribuir positivamente para a redução da carga de sedimentos nos rios, melhorando a qualidade da água (SILVA *et al.*, 2016). As projeções de mudanças climáticas, especialmente sob os cenários RCP do IPCC, indicam que haverá impactos significativos nos padrões de precipitação e, conseqüentemente, nas vazões dos rios. Estudos realizados na Bacia do Rio Hoeya, na Coreia, mostram que, sob o cenário RCP 8.5, o aumento da frequência e

intensidade das chuvas levará a um aumento no risco de enchentes devido a vazões de pico mais elevadas. Além disso, os períodos de seca se tornarão mais severos, resultando em uma diminuição das vazões de base e comprometendo a disponibilidade hídrica (LEE *et al.*, 2017)

Essas observações são relevantes para a Bacia do Rio Macaé, onde a diminuição dos dias de chuva e a redução das vazões mínimas podem afetar a disponibilidade hídrica. A mudança no uso da terra tem efeitos diretos nos fluxos dos rios. Na Bacia do Rio Sokoto Rima-Nigéria, foi observado que as alterações na cobertura vegetal impactam significativamente as vazões (ADAMS *et al.*, 2015). De maneira similar, na Bacia do Alto Rio Mississippi-EUA, os efeitos do uso/cobertura da terra na vazão média anual destacam a importância da gestão integrada dos recursos hídricos (SCHILLING *et al.*, 2008). Estudos específicos sobre a Bacia do Rio Macaé, como o diagnóstico socioambiental e as ações de conservação do solo e da água, são fundamentais para entender as dinâmicas locais (ADNET FLORESTAL, 2015).

A caracterização morfométrica da bacia ajuda a identificar as áreas mais vulneráveis a mudanças no uso do solo e nas práticas agrícolas (ALPINO *et al.*, 2012). A análise de tendências em séries históricas de vazão e precipitação utilizando testes estatísticos não paramétricos, como o teste de Mann-Kendall, é crucial para detectar mudanças significativas. No estudo da Bacia do Rio Macaé, foram identificadas reduções nas vazões mínimas e no número de dias de chuva, o que pode indicar uma menor disponibilidade hídrica futura (MACHADO ET AL., 2013).

2.1 Vazões de referência

A gestão eficiente dos recursos hídricos é uma preocupação fundamental em um mundo cada vez mais consciente da água como um recurso finito e essencial para diversas atividades humanas e ecossistêmicas. Nesse contexto, a avaliação do potencial de uso dos recursos hídricos é crucial para a formulação de políticas e estratégias de manejo sustentável (COELHO; PAIVA; FREITAS, 2023). Historicamente, a determinação desse potencial tem se baseado em vazões de referência anuais, o que pode não refletir adequadamente a variabilidade temporal e espacial dos recursos hídricos (JUNIOR *et al.*, 2021). Assim, integrar abordagens inovadoras e participativas é fundamental para promover um uso mais racional e consciente dos recursos hídricos, alinhando as necessidades sociais e ambientais (COELHO; PAIVA; FREITAS, 2023).

No entanto, uma abordagem que vem ganhando destaque é a substituição das vazões anuais por vazões mensais, buscando maior precisão na avaliação do comportamento hidrológico dos sistemas fluviais ao longo do ano (DUDLEY *et al.*, 2019; RIBEIRO *et al.*, 2019). A variabilidade sazonal das vazões mínimas nas bacias hidrográficas revela diferenças significativas entre os períodos seco e chuvoso (RIBEIRO, SERRANO e OLIVEIRA, 2019), pois durante o período chuvoso, observa-se um aumento nas vazões, enquanto no período seco, as vazões tendem a ser bastante reduzidas. Essa dinâmica impacta diretamente a disponibilidade de água para usos diversos ao longo do ano.

A vazão média de longo prazo é um parâmetro crucial na gestão dos recursos hídricos, pois fornece uma base sólida para a análise da disponibilidade de água. Segundo Pruski e Pruski (2011), essa medida, calculada ao longo de um período de 30 anos, ajuda a suavizar as flutuações sazonais e anuais, resultando em uma avaliação mais confiável do potencial hídrico de um rio. Além disso, estudos como o de Novaes *et al.* (2019) ressaltam que a precisão na estimativa das vazões médias é vital para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos. Eles mostram que diferentes metodologias de regionalização de vazões podem impactar significativamente as estimativas, sendo necessário selecionar a abordagem mais adequada para cada bacia hidrográfica.

A variação da vazão é diretamente influenciada pela variabilidade climática, principalmente pelas variações extra-anuais do clima (TOMER; SCHILLING, 2009). O potencial uso da água em um rio é definido pela combinação da vazão média de longo prazo e das vazões baixas (KIM *et al.*, 2013). Ruskin & Pruski (2011) destacam que a disponibilidade potencial de água é calculada com base na vazão média de longo prazo, enquanto Sahin (2001) resalta que a disponibilidade natural é determinada pelas vazões baixas. Segundo Novaes *et al.* (2009), compreender essas variáveis é crucial para um eficiente planejamento e gestão dos recursos

2.2 Influência da precipitação nas vazões

A precipitação é um dos principais fatores que influenciam a variação das vazões dos rios. A relação entre a precipitação e as vazões fluviais é complexa e mediada por diversos processos hidrológicos, incluindo infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial e armazenamento subterrâneo.

Quando a precipitação ocorre, parte da água infiltra no solo, reabastecendo aquíferos e contribuindo para a vazão base dos rios, que é o fluxo constante mantido por águas

subterrâneas (DINGMAN, 2002). A quantidade de água que infiltra no solo depende da capacidade de infiltração, que varia com a textura do solo, a cobertura vegetal e o grau de saturação do solo antes da precipitação (WARD & TRIMBLE, 2004).

Precipitações intensas, especialmente em curtos períodos, tendem a exceder a capacidade de infiltração do solo, resultando em escoamento superficial significativo. Esse escoamento contribui diretamente para picos de vazão nos rios, muitas vezes causando enchentes (DUNNE & LEOPOLD, 1978). A magnitude desses picos de vazão é influenciada pela intensidade e duração da precipitação, bem como pelas características da bacia hidrográfica, como declividade do terreno e tipo de cobertura do solo (CHORLEY, 1978).

A distribuição temporal da precipitação também é crucial. Em climas com estações chuvosas e secas bem definidas, como em regiões tropicais, as vazões dos rios podem variar drasticamente ao longo do ano. Durante a estação chuvosa, as vazões aumentam devido ao escoamento superficial e à recarga de aquíferos, enquanto na estação seca, a redução da precipitação e o aumento da evapotranspiração reduzem as vazões (TUCCI, 2007).

Além disso, eventos extremos de precipitação, como tempestades e ciclones, podem causar variações abruptas e significativas nas vazões dos rios. Estudos indicam que a frequência e intensidade desses eventos extremos estão aumentando devido às mudanças climáticas, o que pode exacerbar os riscos de enchentes e a variabilidade hidrológica (IPCC, 2014).

Portanto, a precipitação exerce uma influência direta e significativa sobre as vazões dos rios, modulando tanto os fluxos diários quanto os eventos extremos. Compreender essa relação é essencial para a gestão de recursos hídricos, planejamento de infraestruturas e mitigação de desastres naturais.

2.3 Influência do uso e ocupação do solo nas vazões

O uso e a ocupação do solo são fatores cruciais que influenciam significativamente as vazões dos rios. A transformação da paisagem natural em áreas urbanas, agrícolas ou industriais altera os processos hidrológicos, afetando o escoamento superficial, a infiltração e a evapotranspiração. Estudos realizados em diferentes regiões do mundo demonstram como essas mudanças impactam o regime hidrológico das bacias hidrográficas. Na bacia do Rio Verde Grande, MG, o estudo de Albuquerque et al. (2021) mostrou que a expansão agrícola e urbana contribui para um aumento no escoamento superficial e uma redução na infiltração, levando a picos de vazão mais elevados e períodos de seca mais prolongados.

A substituição de florestas por áreas agrícolas ou urbanas tende a aumentar o escoamento superficial, reduzindo a infiltração e a recarga dos aquíferos. Isso ocorre porque a cobertura vegetal natural, especialmente florestal, favorece a infiltração da água no solo e a sua retenção, enquanto superfícies impermeabilizadas, como pavimentos e construções, facilitam o escoamento rápido da água para os rios (LEITHOLD; SCHMIDT; FERNANDES, 2023).

No Brasil, a transformação da vegetação nativa em pastagens e áreas de cultivo tem sido uma prática comum. Essa mudança no uso do solo não apenas aumenta o escoamento superficial, mas também pode levar à degradação dos solos e o assoreamento dos corpos d'água, afetando negativamente a qualidade e a quantidade de água disponível (ACHUGBU et al., 2024)

Estudos realizados em outras partes do mundo corroboram essas observações. Por exemplo, na Bacia do Rio Hoeya, na Coreia, a combinação de mudanças climáticas e alterações no uso do solo, sob cenários RCP do IPCC, mostrou um impacto significativo nos fluxos fluviais, evidenciando a importância de considerar ambos os fatores de forma integrada (LEE; KIM; PARK, 2017).

Na bacia hidrográfica do Rio Barigui, no Brasil, entre 1999 e 2019, o avanço antrópico, com a expansão urbana e a mudança no uso da terra, alterou significativamente o escoamento superficial. Isso foi avaliado pela modificação da curva-número (CN), um indicador que relaciona a capacidade de infiltração do solo com o escoamento superficial, demonstrando um aumento na impermeabilização do solo e conseqüente aumento nas vazões de pico e no risco de enchentes (LEITHOLD, SCHMIDT, & FERNANDES, 2024).

A sub-bacia de Galdinópolis, na cabeceira do Rio Macaé, é um exemplo ilustrativo de como o uso e a ocupação do solo influenciam a saúde de uma bacia hidrográfica. A região do alto curso da bacia do Rio Macaé, especificamente a sub-bacia de Galdinópolis, é caracterizada por um relevo acidentado da Serra do Mar e uma rica biodiversidade de remanescentes de Mata Atlântica. Historicamente, essa área tem sido ocupada por comunidades rurais que dependem da pecuária e da agricultura familiar. No entanto, a utilização inadequada do solo, como a remoção de vegetação nativa e o manejo inadequado dos recursos hídricos, tem levado a uma degradação ambiental significativa (MARÇAL & LUZ, 2003).

Portanto, a gestão sustentável do uso e ocupação do solo é fundamental para manter a saúde das bacias hidrográficas. Medidas como a preservação e recuperação de áreas de vegetação nativa, o manejo adequado dos solos agrícolas e a implementação de infraestruturas

verdes nas áreas urbanas podem ajudar a mitigar os impactos negativos sobre as vazões dos rios e a saúde das bacias hidrográficas.

2.4 A Bacia hidrográfica do rio Macaé

A bacia do rio Macaé, juntamente com as bacias dos rios das Ostras e da lagoa Imboassica, está localizada na região hidrográfica VIII, no estado do Rio de Janeiro, Brasil. Entre as bacias totalmente inseridas no estado, a do rio Macaé é a maior, com uma área de drenagem de aproximadamente 1.765 km² (CBH-MACAÉ-2024). Essa bacia abrange seis municípios, sendo o principal deles Macaé, que possui cerca de 1.448 km² (82%) de seu território dentro da bacia. Os outros municípios incluídos na bacia são Nova Friburgo, com 142 km² e onde estão localizadas as nascentes mais importantes; Casimiro de Abreu, com 83 km²; Rio das Ostras, com 11 km²; Conceição de Macabu, com 70 km²; e Carapebus, também com 11 km² (CBH Macaé- 2024). A bacia do Rio Macaé também recebe contribuições hídricas da sub-bacia do Rio São Pedro através da transposição das águas da bacia do Rio Macabu, realizada pela Usina Hidrelétrica Macabu. De acordo com a análise da rede de isoietas médias anuais, as cabeceiras do rio Macaé, situadas na parte alta da bacia e na região oeste da Região Hidrográfica VIII, apresentam um alto índice pluviométrico (CBH MACAÉ-2024).

Nessa área, a precipitação anual excede 1.900 mm, alcançando aproximadamente 2.500 mm nas nascentes do rio Macaé (Alpino, Pereira & Rocha Leão, 2007). Conforme se avança de oeste para leste, os índices de precipitação diminuem, com o litoral registrando uma média anual em torno de 1.100 mm. Na bacia do rio das Ostras, as chuvas variam de 1.100 a 1.500 mm por ano, sendo mais intensas na parte noroeste da bacia, onde os registros oscilam entre 1.600 e 1.900 mm. O período mais chuvoso ocorre nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, coincidindo com eventos de chuvas mais intensas, com picos de precipitação que podem atingir até 100 mm em 24 horas, ocorrendo em intervalos de 8 a 10 anos (CBH MACAÉ-2024)

Está localizada no Corredor Ecológico Central da Mata Atlântica, também conhecido como corredor do Muriqui, que visa restabelecer a conexão entre os Parques Estaduais do Desengano e Três Picos, os quais fazem parte da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica. A

totalidade da área do alto curso é integrada à Área de Proteção Ambiental Estadual de Macaé de Cima (APAEMC). As nascentes dessa região são protegidas pelo Parque Estadual dos Três Picos (PETP), uma unidade de conservação de proteção integral que se sobrepõe parcialmente à APAEMC, uma unidade de conservação voltada para o uso sustentável (ADNET FLORESTAL, 2015). Segundo Marçal e Luz (2003), a região do alto curso da bacia do Rio Macaé é caracterizada pelo relevo acidentado da Serra do Mar e pela significativa biodiversidade em remanescentes de Mata Atlântica, fatores que motivaram a criação da Área de Proteção Ambiental de Macaé de Cima (APAEMC). Essa área também é marcada pela presença histórica de comunidades rurais, cuja subsistência é baseada predominantemente na pecuária e na agricultura familiar. Os rios desempenham um papel crucial nesse contexto, sendo utilizados para o abastecimento doméstico, irrigação de culturas, sustento da vida selvagem, além de servirem como receptores das águas provenientes das áreas cultivadas e dos despejos domésticos (MARÇAL & LUZ, 2003).

A bacia do rio Macaé é composta por diversas classes de solos, incluindo Latossolos, Argissolos, Espodossolos, Gleissolos, Neossolos Flúvicos, Organossolos e Neossolos Quartzarênicos (CARVALHO FILHO *et al.*, 2000, *apud* MARÇAL & LUZ, 2003). A área também apresenta uma diversidade climática significativa devido à combinação de fatores físicos como altitude, relevo da bacia de drenagem e proximidade com o oceano Atlântico. A temperatura média anual varia em torno de 22°C no verão e 19°C no inverno, enquanto a pluviosidade anual situa-se entre 1.000 e 1.500 mm.

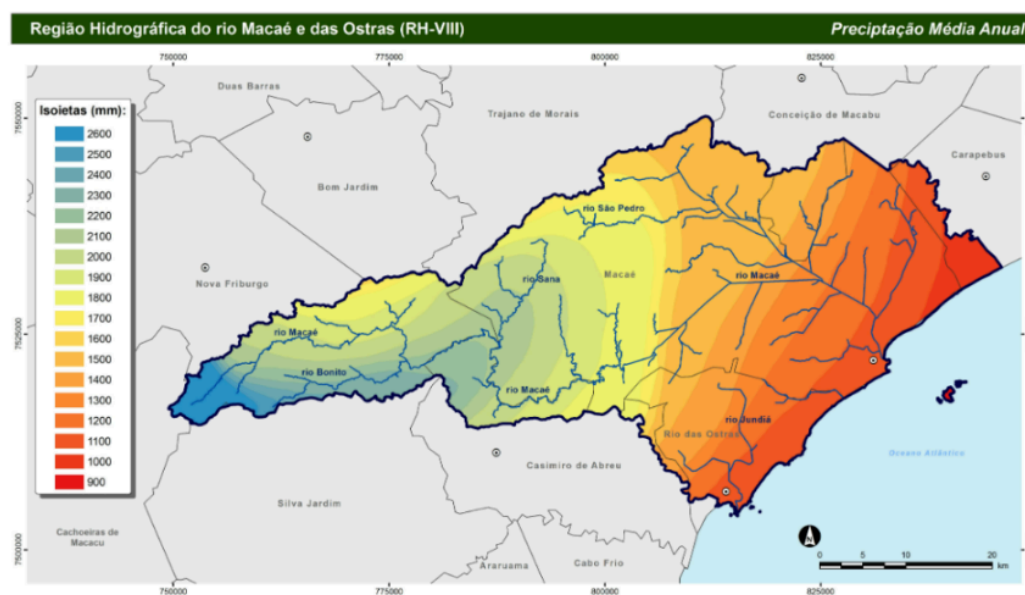


Figura 1 médias anuais Fonte: plano de recursos hídricos Macaé

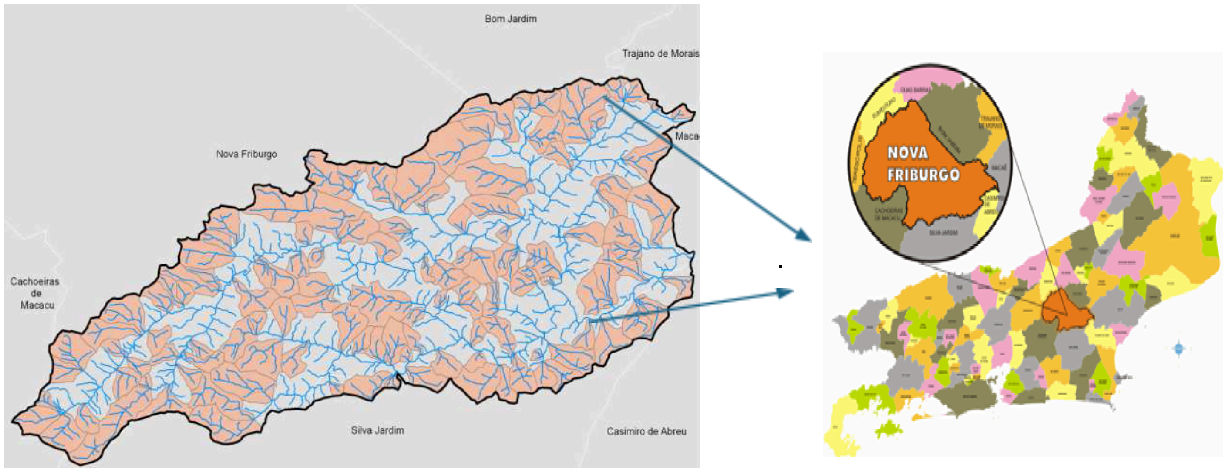


Figura 2: Mapa de localização do Alto Curso da Bacia do Rio Macaé Fonte: Alpino, S. O., Pereira, F. C. S., & Rocha Leão, O. M. (2024).

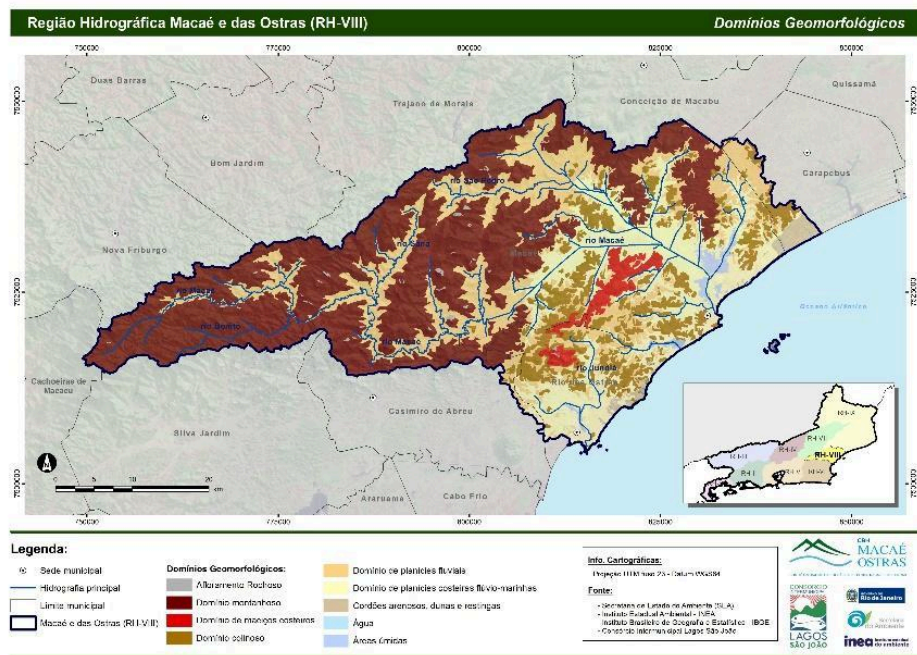


Figura 3 Mapa do relevo da Bacia do Rio Macaé. Fonte: Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Macaé e das Ostras. Relatório de Caracterização da Área de Estudo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no estado do Rio de Janeiro, especificamente na região A área de estudo está localizada na sub-bacia de Galdinópolis, que faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé, situada no estado do Rio de Janeiro, Brasil. Esta sub-bacia está principalmente inserida no município de Nova Friburgo, entre as coordenadas geográficas aproximadas de 22°17' a 22°20' de latitude sul e 42°15' a 42°17' de longitude oeste (Kich et al., 2021). A sub-bacia de Galdinópolis é delimitada pela estação fluviométrica 59125000 (Galdinópolis), com uma área de drenagem significativa que abrange cerca de 178 km².

O relevo da região é caracterizado por uma topografia montanhosa, com altitudes que variam de 200 a 1500 metros, influenciando diretamente o regime de chuvas orográficas predominantes na área. Estas chuvas são causadas pelo levantamento orográfico do ar úmido, resultando em precipitações que variam de 1200 mm a 1800 mm anuais, conforme dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O clima predominante da região é do tipo Cwb, de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado por verões amenos e invernos secos, com temperatura média anual variando entre 18°C e 24°C (Kich et al., 2021). A vegetação dominante é a Mata Atlântica, que inclui florestas ombrófilas densas e florestas de araucária, desempenhando um papel crucial na manutenção dos recursos hídricos e na regulação do microclima local.

Dentro dessa área, foram identificadas duas estações pluviométricas e duas fluviométricas, conforme detalhado na Tabela 1. As estações fluviométricas são 59125000 e 59120000, localizadas no Rio Macaé e no Rio Macaé de Cima, respectivamente. Abaixo está a figura 4 com o mapa de localização da região.

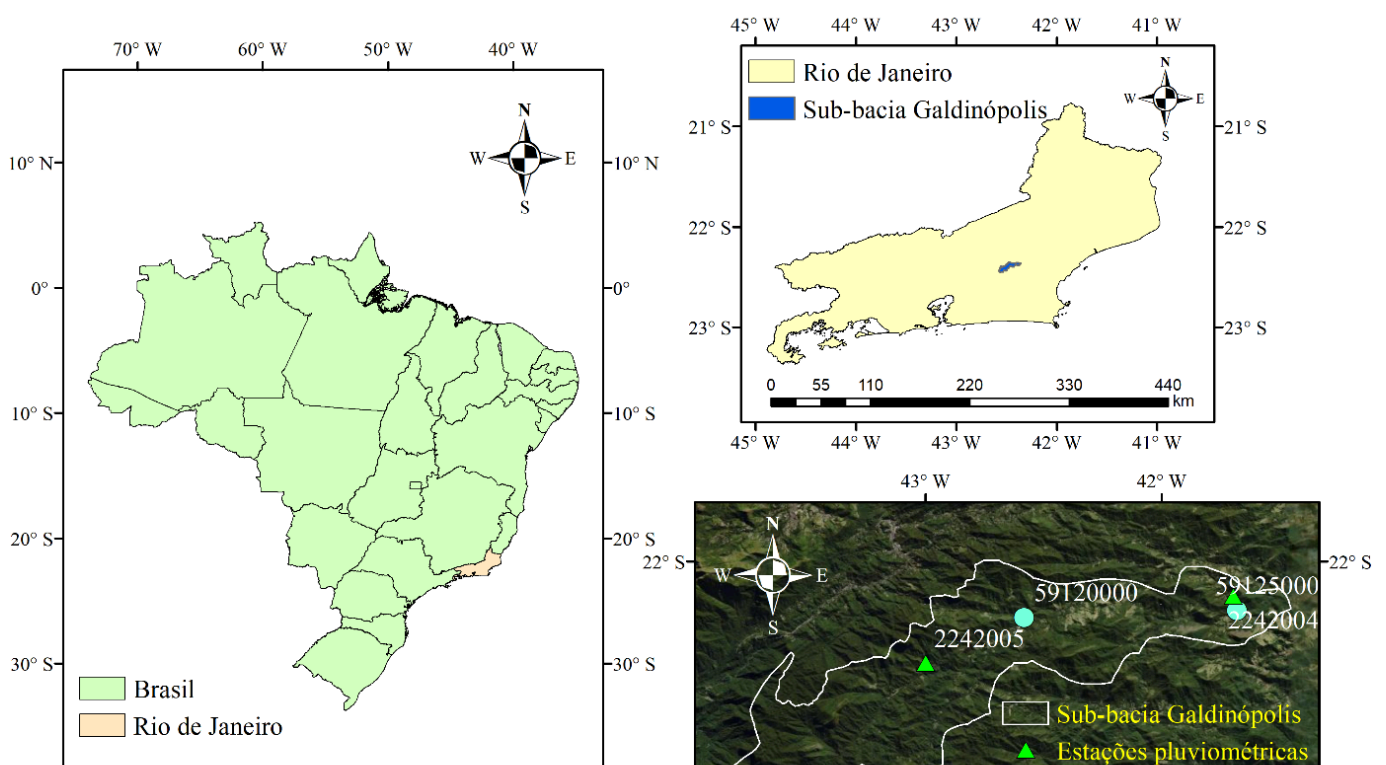


Figura 4: Mapa de localização do estado do Rio de Janeiro no Brasil, da sub-bacia Gadinópolis no estado do Rio de Janeiro e da localização das estações na sub-bacia Gadinópolis. Fonte: Abreu, M. C. (2024).

Tabela 1. Identificação das estações fluviométricas e pluviométricas na área de estudo.

<i>Estação</i>	Tipo	Nome	Latitude	Longitude	Altitude	Área de drenagem (km²)	Rio	Série
59125000	Fluviométrica	Galdinópolis	-22.369	-423.792	740	104	Macaé	1972-2021
59120000	Fluviométrica	Macaé de Cima	-22.372	-424.622	870	67	Macaé de cima	1972-2021
2242004	Pluviométrica	Galdinópolis	-22.363	-423.808	740	-	-	1951-2023
2242005	Pluviométrica	Fazenda São João	-22.39	-424.947	960	-	-	1968-2022

4.2 Vazão

Para analisar a disponibilidade hídrica na região, foram utilizados dados de vazão mínima de 7 dias consecutivos, máxima e média das estações de Macaé de Cima e Galdinópolis, fornecidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Esses dados abrangem uma série histórica de vazões diárias com início em 1972 e término em 2021. A análise das vazões máximas (Q_{max}), médias (Q_{min}) e mínimas de sete dias consecutivos (Q_{min7}) foi conduzida utilizando o software SisCAH, que permite a avaliação detalhada das características das séries hidrológicas da bacia. O uso do SisCAH possibilitou a integração e processamento dos dados de vazão, facilitando a identificação de percentual de falhas e de padrões e variações nas vazões ao longo do tempo. A análise das vazões mínima, máxima e média é crucial para compreender a disponibilidade hídrica da região, permitindo também avaliar o impacto de diferentes fatores, como o uso e ocupação do solo e as mudanças climáticas, sobre o regime hidrológico.

4.3 Precipitação

Os dados de precipitação foram coletados das estações meteorológicas pluviométricas, disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Para a construção da série histórica, foi considerado um intervalo de tempo abrangendo os anos de 1951 a 2023, totalizando 72 anos de dados. A partir das precipitações diárias, integralizou-se a precipitação total anual e o número de dias com chuva das estações 2242004 e 2242005, em planilhas de Excel. O critério de exclusão dos dados adotado foi o de considerar apenas séries sem falhas, ou seja, aquelas em que não houve períodos significativos de ausência de registros, garantindo a qualidade e a integridade das análises realizadas.

4.4 Uso e Ocupação do Solo

Dados de usos e ocupação do solo foram retirados da plataforma MapBiomas, coleção 8, correspondente às áreas (ha) de diferentes classes. As classes utilizadas foram: Formação Florestal, Mosaico de Usos, Pastagem e Silvicultura. Para obter e trabalhar com os dados de uso e ocupação do solo utilizou-se uma série histórica de 1985 a 2022, um período de 37 anos

de obtenção de dados. As áreas de cada classe foram recortadas a partir do recorte geográfico da área interesse (sub-bacia Galdinópolis), para cada ano de análise.

4.5 Análises estatísticas

No processo analítico, foram aplicados os testes estatísticos de Mann-Kendall e Pettitt, que permitem identificar tendências temporais e mudanças abruptas nos dados de classes de uso e ocupação do solo, precipitação e vazões ao longo do período estudado (FERNANDES *et al.*, 2022).

O teste de Pettitt é uma técnica estatística utilizada para identificar mudanças abruptas em séries temporais, como dados climáticos ou hidrológicos. Ele funciona ao comparar valores antes e depois de possíveis pontos de quebra, buscando determinar se existe uma diferença estatisticamente significativa entre essas duas partes da série (LIRA; SILVA, 2021). Sua principal aplicação se dá na análise de séries temporais para identificar momentos em que ocorreram mudanças significativas.

O teste de Mann-Kendall é uma ferramenta estatística utilizada para detectar tendências em séries temporais (MANN, 1945; KENDALL, 1975), especialmente em dados hidrológicos e climáticos. Ele se baseia na comparação de valores sucessivos na série, atribuindo sinais positivos ou negativos a essas comparações. O teste avalia a hipótese nula de que não há tendência, permitindo identificar se a série apresenta uma tendência crescente ou decrescente ao longo do tempo. (SILVA; DETZEL, 2022).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{i=k+1}^n \text{sgn}(x_i - x_k) \quad \text{Eq. 1}$$

em que x_i é a i -ésima observação, x_k é a k -ésima observação, imediatamente posterior a i -ésima observação e n é o número de elementos da série temporal.

A variância é determinada pela relação:

$$\text{Var}(S) = \frac{n \cdot (n-1) \cdot (2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1) \cdot (2 \cdot t_{i+5})}{18} \quad \text{Eq. 2}$$

em que, m é o número de grupos amarrados, t_i é o número de laços de extensão igual a i .

O teste de Pettitt (Pettitt,1979) utiliza a estatística de Mann-Whitney $U_{(t,M)}$ para verificar se duas amostras pertencem a mesma população. Dessa forma, o teste coloca a série de dados em duas amostras: x_1, x_2, \dots, x_t e $x_{t+1}, x_{t+2}, \dots, x_n$, e calcula $U_{(t,M)}$ da seguinte forma:

$$U_{(t,n)} = U_{(t-1,n)} + \sum_{j=1}^n \text{sgn}(x_t - x_j) \quad \text{Eq. 3}$$

em que:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

A estatística de Pettitt contabiliza o número de excedências em que o valor da primeira amostra excede o da segunda amostra. A hipótese nula do teste é de que não existe um ponto de ruptura na série de dados.

O nível de significância adotada foi de 5%, conforme também adotado por outros autores e os testes foram realizados em ambiente R.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 mostra a média e o desvio padrão de todas as variáveis estudadas, ou seja, as áreas das classes de uso e ocupação do solo, precipitações anuais, número de dias com chuva anuais, Qmax, Qmed e Qmin. Também mostra a média antes e depois do ponto de quebra em séries que apresentaram tendência temporal significativa. Já as figuras 5, 6 e 7 e 8 mostram a variação temporal das precipitações anuais e dias com chuva, áreas de classes de uso e ocupação do solo e das vazões de referência, respectivamente.

Tabela 2. Médias e desvios padrões das séries completas e média antes e depois do ponto de quebra em séries com tendências significativas

Itens	Série	Média	Desvio padrão	Média antes de K	Média depois de K
Qmax_59125000 (m ³ /s)	1972-2021	32.75	14.04	89.868	
Qmed_59125000 (m ³ /s)	1972-2021	3.96	0.82		
Qmin_59125000 (m ³ /s)	1972-2021	1.43	0.22		
Qmax_59120000 (m ³ /s)	1972-2021	31.29	3.88		
Qmed_59120000 (m ³ /s)	1972-2021	31.29	3.88		
Qmin_59120000 (m ³ /s)	1972-2021	14.62	2.94	16.11	13.33
Chuva_2242004 (mm)	1951-2023	1903.17	334.06		
DC_2242004 (dias)	1951-2023	145.64	30.42	154.53	104.62
Chuva_2242003 (mm)	1968-2023	2141.95	337.69		

DC_2242003 (dias)

1968-2023	148.71	35.29	144.86	162.50
-----------	--------	-------	--------	--------

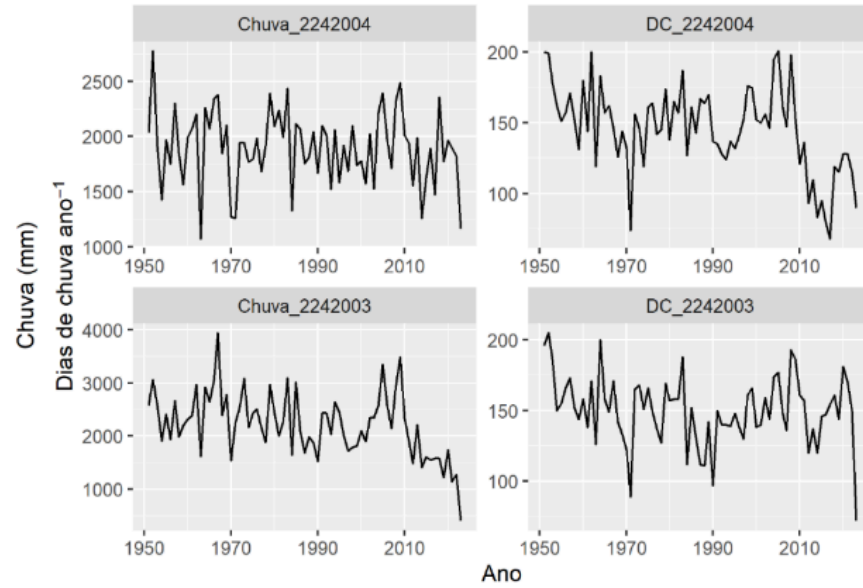


Figura 4 Gráfico com a variação de dias de chuva nas estações Galdinópolis e Macaé de cima.

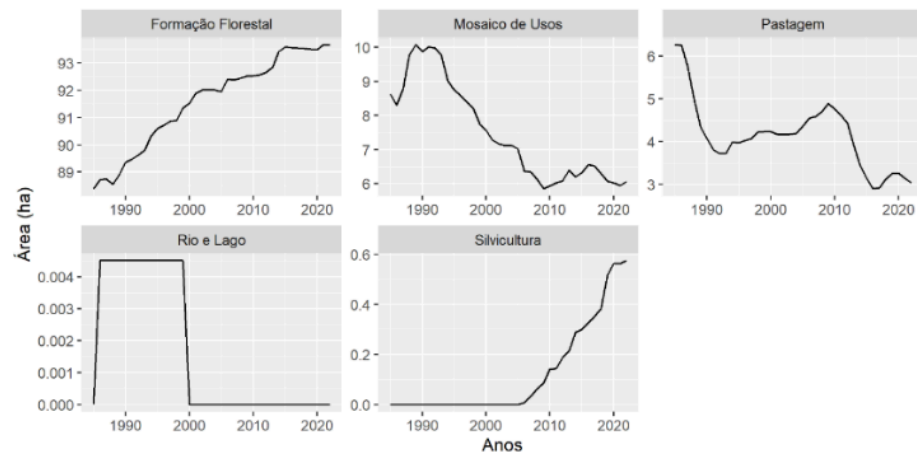


Figura 5 Gráfico com a variação ao longo da série histórica do uso e ocupação do solo.

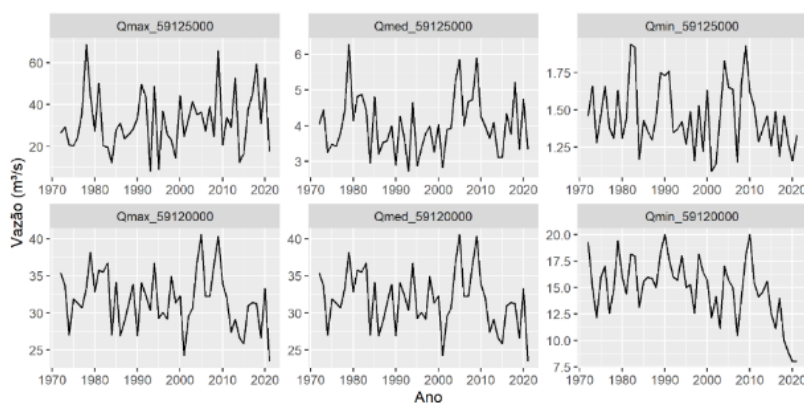


Figura 6 Gráfico com a variação nos dados de vazão das estações de Galdinópolis e Macaé de Cima

Os resultados deste estudo sobre a variação espaço-temporal no médio e alto curso do Rio Macaé revelam tendências significativas nas classes de uso do solo e nas características hidrológicas da região, abrangendo séries históricas de 1985 a 2022 para o uso do solo, de 1951/1968 a 2023 para a precipitação e de 1972 a 2021 para as vazões. As análises de tendência, baseadas no teste de Mann-Kendall, e a magnitude das mudanças representadas pelo Sen's slope, mostraram mudanças significativas em todas as classes de uso do solo (Tabela 3). Ou seja apresentaram comportamento de mudança com o tempo, tanto de aumento quanto de redução. As áreas de Formação Florestal e Silvicultura apresentaram tendências de aumento com taxas de crescimento de 0,15 hectares por ano e 0,01 hectares por ano, respectivamente. Esses resultados indicam uma expansão das áreas florestais e das plantações comerciais de árvores, possivelmente como reflexo de políticas de conservação e práticas de manejo sustentável e silvicultura. Por outro lado, as áreas de Pastagem e Mosaico de Usos mostraram tendências significativas de redução, com decréscimos médios de 0,04 hectares por ano e 0,12 hectares por ano, respectivamente.

Os resultados que indicam uma expansão das áreas florestais e das plantações comerciais de árvores podem ser interpretados como reflexo de políticas de conservação e práticas de manejo sustentável que têm sido implementadas nos últimos anos. Segundo Silva et al. (2017), A Lei da Mata Atlântica estabelece um conjunto de diretrizes que visa proteger e restaurar esse bioma vital, promovendo ações que incentivam a recuperação de ecossistemas degradados e a adoção de práticas de manejo sustentável. Essas iniciativas não apenas têm contribuído para a recuperação da vegetação nativa, mas também proporcionado incentivos econômicos para os proprietários rurais que adotam práticas que favorecem a conservação

ambiental (SILVA et al., 2017). A análise das taxas de crescimento observadas nas áreas de Formação Florestal e Silvicultura sugere que essas políticas estão começando a apresentar resultados positivos, criando um ambiente mais propício à recuperação da cobertura florestal.

Análise das séries de precipitação revelou que não há tendência nos totais anuais de chuva, mas existe tendência significativa de redução no número de dias de chuva nas estações 2242004 e 2242005, com uma taxa de decréscimo de 0,64 e 0,90 dias por ano, respectivamente, ou seja, aproximadamente 1 dia a cada ano. A redução no número de dias chuvosos pode impactar negativamente as regiões a jusante da bacia, especialmente aquelas mais distantes, onde a disponibilidade de água é mais crítica. O ponto de quebra nas séries de dias com chuva ocorreu após o ano 2000. Estudos com tendências climáticas nos registros históricos de uma rede hidrológica destacam que as mudanças nos padrões de precipitação, incluindo a redução dos dias chuvosos, podem influenciar significativamente o regime hidrológico e a disponibilidade de água (SCOFIELD *et al.*, 2014).

A precipitação total anual também não apresentou tendências em outros locais no Brasil, como o estado de Alagoas, em que Abreu et al. (2023) analisaram 45 estações pluviométricas e em apenas 3 estações foram detectadas tendências. As tendências anuais tendem a ser de difícil detecção uma vez que essa análise não contempla a variabilidade mensal ou sazonal. No estudo de Abreu et al. (2023), a análise mensal e sazonal encontrou mais tendências indicando mudança nos padrões de chuva.

Tabela 2. Resultado dos testes de tendencia temporal para as classes de uso e ocupação do solo, precipitação, número de dias com chuva e disponibilidade hídrica representada pelas vazões de referência.

<i>Classes</i>	<i>Série</i>	p-valor Mann-Ken dall	Sen's slope	Interpretação	p-valor Pettitt	Ano da quebra	Interpretação
Formação Florestal	1985-2022	0.0000	0.1486	Com tendência	0.0000	2003	Com tendência
Mosaico de Usos	1985-2022	0.0000	-0.1207	Com tendência	0.0000	2004	Com tendência
Pastagem	1985-2022	0.0096	-0.0361	Com tendência	0.0007	2013	Com tendência
Silvicultura	1985-2022	0.0000	0.0116	Com tendência	0.0000	2006	Com tendência
Qmax_59125000	1972-2021	0.2219	0.1780	Sem tendência	0.5216	2000	Sem tendência
Qmed_59125000	1972-2021	0.8147	0.0029	Sem tendência	0.5728	2004	Sem tendência
Qmin_59125000	1972-2021	0.1888	-0.0028	Sem tendência	0.5299	2012	Sem tendência
Qmax_59120000	1972-2021	0.0895	-0.0603	Sem tendência	0.1271	2012	Sem tendência
Qmed_59120000	1972-2021	0.0895	-0.0603	Sem tendência	0.1271	2012	Sem tendência
Qmin_59120000	1972-2021	0.0008	-0.0953	Com tendência	0.0081	2001	Com tendência
Chuva_2242004	1951-2023	0.1871	-2.3580	Sem tendência	0.6067	2011	Sem tendência
DC_2242004	1951-2023	0.0001	-0.6440	Com tendência	0.0004	2010	Com tendência
Chuva_2242005	1968-2023	0.7715	-0.9297	Sem tendência	0.7715	2028	Sem tendência
DC_2242005	1968-2023	0.0026	0.9000	Com tendência	0.0039	2002	Com tendência

- Valores em vermelho indicam resultados complementares (Sen's slope e ponto de quebra (k)) de testes não significativos.
- A letra "K" indica pontos de mudança abrupta em séries temporais. Mede as diferenças acumuladas entre observações antes e depois de um potencial ponto de mudança.

Em relação às vazões de referência, a maioria não apresentou tendências significativas de aumento ou redução. Contudo, a estação 59120000 (Galdinópolis) registrou uma redução significativa na vazão mínima (Q_{min}), com taxa de $-0,0953 \text{ m}^3/\text{s}$ por ano, indicando uma possível diminuição na disponibilidade hídrica na região. Os dados das séries históricas apontam que o ponto de quebra na vazão mínima desta estação ocorreu em 2001, momento próximo a alteração do número de dias com chuva na estação pluviométrica 2242005, próximo e à jusante da estação fluviométrica. A média antes desse ponto de quebra era de $16,11 \text{ m}^3/\text{s}$ e após foi de $13,33 \text{ m}^3/\text{s}$. De maneira geral, as tendências de modificações nos padrões das vazões correspondem a mudanças na precipitação (CECÍLIO *et al.*, 2021).

Essas mudanças na precipitação e na vazão têm implicações diretas para o abastecimento da cidade de Macaé, um importante polo industrial conhecido como a "cidade do petróleo". A redução da pastagem e aumento da área florestada, mesmo que em pequena magnitude em área (no máximo $0,15 \text{ há ano}^{-1}$), indicam que a sub-bacia de Galdinópolis preservada, favorecerá a infiltração da água no solo em períodos chuvosos, favorecendo o aumento das vazões mínimas no período de estiagem (RAO, 2020). Essas atividades alteram o ciclo hidrológico e, conseqüentemente, o regime de vazão (CECÍLIO *et al.*, 2021).

Em conclusão, os resultados deste estudo destacam a importância do monitoramento contínuo e da gestão adaptativa dos recursos naturais na região. A expansão das áreas florestais e de silvicultura pode oferecer benefícios ambientais significativos, como a manutenção da quantidade e qualidade da água e a redução de sedimentos nos rios. No entanto, as reduções nas áreas de pastagem, mosaico de usos e nas vazões mínimas, bem como a diminuição nos dias de chuva, representam desafios significativos que devem ser enfrentados com políticas de manejo sustentável, estratégias de conservação e no entendimento de causa e efeito das relações entre uso e ocupação do solo, precipitação e vazões. Estas medidas são essenciais para garantir a sustentabilidade a longo prazo dos recursos naturais e dos serviços ecossistêmicos na região.

6. CONCLUSÃO

A análise dos dados hidrológicos e climáticos na Bacia do Rio Macaé revelou mudanças significativas nos padrões de precipitação e vazão, que requerem atenção urgente e medidas adequadas de gestão. Uma das observações mais preocupantes é a diminuição da vazão mínima em uma das estações fluviométricas, o que indica um comprometimento na disponibilidade de água durante os períodos de estiagem. Essa tendência sugere que a

capacidade dos rios de manter o fluxo contínuo em épocas secas está reduzindo, o que pode afetar o abastecimento hídrico da região, especialmente nos meses críticos.

Além disso, a redução média de um dia de chuva por ano aponta para uma alteração no regime de precipitação que, em conjunto com a diminuição do total anual precipitado em uma das estações, reforça a tendência de redução dos recursos hídricos disponíveis. Entretanto, essa diminuição nos dias chuvosos não significa necessariamente uma redução total no volume de precipitação. Em vez disso, pode estar ocorrendo uma redistribuição espacial e temporal das chuvas, onde menos dias chuvosos resultam em eventos de precipitação mais concentrados e intensos, levando a chuvas extremas em outras áreas. Isso pode aumentar o risco de enchentes, erosão do solo e fluxos repentinos, comprometendo ainda mais a gestão hídrica na bacia.

Analisando o uso e ocupação do solo na região, constatamos um aumento na formação florestal e na área de silvicultura, enquanto as áreas de pastagem diminuíram. Este aumento na cobertura florestal, embora positivo para a conservação ambiental, pode estar relacionado à diminuição da vazão mínima observada. A cobertura florestal, especialmente quando envolve silvicultura, pode aumentar a evapotranspiração e o consumo de água pelas plantas, reduzindo a quantidade de água que chega aos corpos hídricos, especialmente durante os períodos secos. Isso pode explicar parcialmente a baixa vazão mínima, uma vez que as florestas e plantações de árvores como o eucalipto tendem a consumir grandes volumes de água subterrânea, afetando o fluxo base dos rios.

Essa dinâmica de uso do solo sugere uma relação complexa entre conservação ambiental e disponibilidade hídrica. Enquanto a redução de áreas de pastagem pode reduzir o escoamento superficial e melhorar a infiltração em certas áreas, o aumento das áreas de silvicultura pode contrabalançar esses benefícios ao consumir mais água durante períodos críticos.

No entanto, as características hidrológicas da bacia do Rio Macaé são fortemente influenciadas pelas condições de uso e ocupação do solo, o que evidencia uma relação de causa e efeito intrínseca (PERAZZOLI et al., 2013). A vegetação da Mata Atlântica desempenha um papel crucial na regulação do ciclo hídrico e na conservação do solo, mas tem sido pressionada por atividades humanas. A cabeceira do Rio Macaé é especialmente estratégica, pois fornece água para toda a bacia hidrográfica, incluindo a cidade de Macaé, um importante centro petrolífero. A segurança hídrica de mais de 300 mil habitantes depende criticamente da conservação ambiental local (Marçal & Luz, 2003).

O presente estudo enfatiza a necessidade de uma abordagem integrada que considere tanto os fatores climáticos quanto as atividades antropogênicas na gestão dos recursos hídricos. Somente através de uma ação coordenada e informada será possível garantir a sustentabilidade hídrica da Bacia do Rio Macaé, garantindo o abastecimento de água e a preservação ambiental na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Marcel Carvalho; FRAGA, Micael de Souza; ALMEIDA, Laura Thebit de; SILVA, Felipe Bernardes; CECÍLIO, Roberto Avelino; LYRA, Gustavo Bastos; DELGADO, Rafael Coll. **Vazão na bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, Brasil: modelagem probabilística, vazão de referência e regionalização**. Física e Química da Terra, Partes A/B/C, v. 126, p. 103133, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103133>. Acesso em: 10 jul. 2024.

ACHUGBU, Ifeanyi Chukwudi; OLUFAYO, Ayo Akinlabi; BALOGUN, Ifeoluwa Adebowale; MCALLISTER, Molly; ADEFISAN, Elijah Adesanya; NAABIL, Edward. **Potential effects of Land Use Land Cover Change on streamflow over the Sokoto Rima River Basin**. Heliyon, v. 8, n. 7, e09779, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09779>. Acesso em: 30 jul. 2024.

ADNET FLORESTAL. **Diagnóstico socioambiental e projeto técnico de ações de conservação do solo e da água da sub bacia do alto curso do rio Macaé**. ANA-MMA: Nova Friburgo, 2015.

AIT M'BAREK, Samir; BOUSLIHIM, Yassine; ROCHDI, Aicha; MIFTAH, Abdelhalim; BEROHO, Mohamed. **O impacto combinado de cenários de mudanças climáticas e mudanças no uso da terra sobre os recursos hídricos em uma bacia hidrográfica semiárida**. Científico Africano, v. 25, p. e02319, set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02319>. Acesso em: 10 jul. 2024.

AIT M'BAREK, Samir; BOUSLIHIM, Yassine; ROCHDI, Aicha; MIFTAH, Abdelhalim; BEROHO, Mohamed. **The combined impact of climate change scenarios and land use changes on water resources in a semi-arid watershed**. Scientific African, v. 15, art. e02319, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02319>. Acesso em: 30 jul. 2024.

ALBUQUERQUE, Lorrana Cavalcanti; AMARAL, Pedro Augusto Alves; VIEIRA, Edson de Oliveira; RODRIGUES, Flávia Mazzer; ALMEIDA, Rodrigo Praes de. **Influência do uso e ocupação do solo sobre a vazão do alto da bacia do Rio Verde Grande - MG**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 26, n. 1, p. e26, 2021. Disponível em: <https://orcid.org/0000-0001-8738-5369>. Acesso em: 27 jul. 2024.

ALPINO, Suelen. O., Pereira, Fernanda. C. Souza., & Rocha Leão, Otávio. M. (2007). **Parâmetros Morfométricos do Alto Curso da Bacia do Rio Macaé (RJ): subsídios ao entendimento da dinâmica geomorfológica**.

BOGALE, Temesgen; SENHORAS, Shimeles; SEYOUM, Aseffa; HAREGEWEYN, Nigussie. **Análise da intensidade da mudança no uso do solo e cobertura do solo para gestão sustentável dos recursos naturais: O caso das terras altas do noroeste da Etiópia.** *Aplicações de Sensoriamento Remoto: Sociedade e Meio Ambiente*, v. 34, p. 101170, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101170>. Acesso em: 10 jul. 2024.

BRITO, Thábata. T., OLIVEIRA-JÚNIOR, José. F., LYRA, Gustavo. B. L., Gois. Givanildo.; Zeri. Marcelo. **Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state, Brazil.** *Meteorol Atmos Phys* 129, 469–478 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00703-016-0481-x>, 2016.

CBH Macaé. **Características Ambientais.** Disponível em: <https://cbhmacae.eco.br/a-bacia/caracteristicas-ambientais/>. Acesso em: 10 jul. 2024.

CECÍLIO, Roberto Avelino et al. **Trends in monthly and annual streamflow related to rainfall and land use at the Atlantic rainforest biome.** *Journal of South American Earth Sciences*. Volume 112, Part 2, p. 103600, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103600>. Acesso em: 16 jul. 2024.

CHORLEY, Richard. J. (1978). **The hillslope hydrological cycle.** In R. J. CHORLEY (Ed.), *Water, Earth, and Man: A Synthesis of Hydrology, Geomorphology, and Socio-Economic Geography* (pp. 187-212). Methuen & Co.

DUDLEY, Robert W.; HIRSCH, Robert M.; ARCHFIELD, Stacey A.; BLUM, Andrea G.; RENARD, Benjamin. **Low streamflow trends at human-impacted and reference basins in the United States.** *Journal of Hydrology*. V. 580, art. 124254, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124254>. Acesso em: 30 jul. 2024.

DUNNE, T., & LEOPOLD, L. B. (1978). **Water in Environmental Planning.** W. H. Freeman and Company.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. Projeto de Pesquisa de Estudo de Cheias no Baixo Curso do Rio Macaé, em Especial sobre o Núcleo Urbano, **2º relatório: Diagnóstico da Situação Atual dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Macaé.** p.251. 2004.

GARBOSSA, Luis. Hamilton. P.; PINHEIRO, Adilson. **Vazões de referência para gestão de bacias hidrográficas rurais e urbanas sem monitoramento.**

IPCC. (2014). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.** Cambridge University Press.

KAYSER, Rafael. Henrique. B.; TSCHIEDEL, Arthur. de F.; CYBIS, Luiz. Fernando. DE A.; COLLISCHONN, Walter. **Comparativo entre o modelo QUAL2K e uma metodologia simplificada de modelagem da qualidade da água integrada a um ambiente de sistema de informações geográficas: estudo de caso na bacia do Rio Macaé.**

KIM, Jinsoo; CHOI, Jisun; CHOI, Chuluong; PARK, Soyoun. **Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea.** *Science of The Total Environment*, v. 452–453, p. 181-195, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.005>. Acesso em: 30 jul. 2024.

KÖPPEN'S CLIMATE CLASSIFICATION MAP FOR BRAZIL. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

LAZZAROTTO, Henrique.; CARAMASCHI, Erica. P. **Introdução da truta no Brasil e na bacia do Rio Macaé, estado do Rio de Janeiro histórico, legislação e perspectivas.** *Oecologia Brasiliensis*, v. 13, n. 4, p. 649-659, 2009. doi:10.4257/oeco.2009.1304.08

LEITHOLD, Juliana.; SCHMIDT, Marcio. Augusto. R.; FERNANDES, Cristóvão. Vicente. S. **Avanço antrópico na bacia hidrográfica do Rio Barigui entre 1999 e 2019 e seu impacto sobre o escoamento superficial avaliado pela alteração da sua curva-número (CN), 2020**

LIMA, Raphael. Nunes. de S.; MARÇAL, Mônica. dos S. **Avaliação da condição geomorfológica da bacia do Rio Macaé – RJ a partir da metodologia de classificação dos estilos fluviais, 2013.**

LIRA, Gustavo Arruda Ramalho; SILVA, Tarciso Cabral da. **Tentativa de explicação da não-homogeneidade das séries de vazão das sub-bacias do rio Gramame através da análise das fases do escoamento total.** In: XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2021, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2021.

MARÇAL, S. Mônica. **Análise das mudanças morfológicas em seções transversais ao rio Macaé - RJ.** *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.14, n.1, p.59-68, 2013.

MATA ATLÂNTICA E PRESERVAÇÃO: **como nossas atitudes de hoje impactarão em nosso futuro?** Disponível em: <<https://cafeberrodagua.com.br/mata-atlantica-e-preservacao-como-nossas-atitudes-de-hoje-impactarao-em-nosso-futuro/>>. Acesso em: 10 jul. 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Relatório final do Programa Floresta+.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2023. [PDF]. Disponível em: <file:///C:/Users/Maryanna%20Henriques/Downloads/Relat%C3%B3rio%20Final%20Programa%20Floresta+%20nov.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2024.

MORAES, Jorge. M.; GENOVEZ, Abel. M.; MORTATTI, Jefferson.; BALLESTER, Maria. V.; KRUSCH, Alex. V.; MARTINELLI, Luiz. A.; VICTORIA, Reynaldo. L. **Análise de intervenção das séries temporais de vazão dos principais rios da bacia do Rio Piracicaba.**

NASA. **Climate Impact on Water Resources in Brazil: Projections for 2070.** NASA Goddard Institute for Space Studies, 2023. Disponível em: https://nasa.gov/climate/impact/water_resources_brazil_2070. Acesso em: 27 jul. 2024.

NOVAES, R. M.; BARROS, M. T. L.; PRADO, R. B.; MATTOS, A. **Impacto da variabilidade climática nas vazões de referência: estratégias de mitigação.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 3, p. 37-47, 2009.

NUÑEZ, Joaquin A.; AGUIAR, Sebastián; JOBBÁGY, Esteban G.; JIMÉNEZ, Yohana G.; BALDASSINI, Pablo. **Efeitos das mudanças climáticas e da cobertura do solo na produção de água em uma bacia hidrográfica subtropical que abrange a transição yungas-chaco da Argentina.** *Journal of Environmental Management*, v. 2024, p. 120808, set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120808>. Acesso em: 10 jul. 2024.

PENEREIRO, Júlio César; MARTINS, Luíza La Salvia; BERETTA, Victor Zeni. **Identificação de tendências sazonais dos regimes climático e hidrológico na bacia hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia, Brasil.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Campinas, 2024.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A; KAUFMANN, V. **Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia – SC.** Revista *Árvore*, v.37, n.5, p.859-869, 2013.

PRUSKI, Fernando Falco; PRUSKI, Félix dos Santos. Avaliação da disponibilidade hídrica. In: PRUSKI, Fernando Falco (Org.). **Hidrologia: Princípios e Aplicações.** Viçosa: Editora UFV, 2011. Cap. 7, p. 234-268.

PRUSKI, Fernando Falco; PRUSKI, Félix dos Santos. **Avaliação da disponibilidade hídrica.** In: PRUSKI, Fernando Falco (Org.). **Hidrologia: Princípios e Aplicações.** Viçosa: Editora UFV, 2011. Cap. 7, p. 234-268.

RAO, Nageswara. K. **Analysis of surface runoff potential in ungauged basin using basin parameters and SCS-CN method.** *Applied Water Science*, v. 10, n. 47, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1129-z>.

REZENDE, C. L.; SCARANO, F. R.; ASSAD, E. D.; JOLY, C. A.; METZGER, J. P.; ESTRASBURGO, B. B. N.; TABARELLI, M.; FONSECA, G. A.; MITTERMEIER, R. A. **Do hotspot ao hopepoint: uma oportunidade para a Mata Atlântica brasileira.** *Perspectivas em Ecologia e Conservação*, v. 16, n. 4, p. 208-214, out./dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002>. Acesso em: 10 jul. 2024.

RUSKIN, Fernando Falco; PRUSKI, Félix dos Santos. **Vazões de referência e sua importância na gestão de recursos hídricos.** *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 2, p. 440-450, 2011.

SAHIN, Vedat. **The importance of low flows for natural water availability assessments.** *Water Resources Management*, v. 15, n. 4, p. 291-304, 2001.

SANTOS, Eleonora; CARVALHO, Milena; MARTINS, Susana. **Gestão Sustentável da Água: Compreendendo as Dimensões Socioeconômica e Cultural. Sustentabilidade.** Leiria: Instituto Politécnico de Leiria, v. 15, n. 17, p. 13074, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151713074>. Acesso em: 10 jul. 2024.

SCOFIELD, Gaziela. B.; ANGELIS, Carlos. F.; SOUSA JUNIOR, Wilson. C. **Estudo das tendências do total de precipitação e do número de dias para eventos extremos no Litoral Norte, SP.** In: Simpósio Internacional De Climatologia, 4., João Pessoa, 2011. Anais eletrônicos, 2011. Disponível em: <http://www.sic2011.com/sic/arq/60189253474666018925347.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2024.

SILVA, Nathalli Rogiski da; DETZEL, Daniel Henrique Marco. **Modificações do teste de Mann-Kendall: a importância das premissas de testes estatísticos.** In: XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2021, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2021.

SILVA, José Maria Cardoso da; PINTO, Luiz Paulo; HIROTA, Márcia; BEDÊ, Lúcio; TABARELLI, Marcelo. **Conservação da Mata Atlântica brasileira: um balanço dos últimos dez anos.** In: CABRAL, Diogo de Carvalho; BUSTAMANTE, Ana Goulart (Orgs.). *Metamorfoses florestais: Culturas, ecologias e as transformações históricas da Mata Atlântica.* 2017.

SOUZA JR., Carlos M.; SHIMBO, Julia Z.; ROSA, Marcos R.; PARENTE, Leandro L.; ALENCAR, Ane A.; RUDORFF, Bernardo F. T.; HASENACK, Heinrich; MATSUMOTO, Marcelo; FERREIRA, Laerte G.; SOUZA-FILHO, Pedro W. M.; OLIVEIRA, Sergio W. de; ROCHA, Washington F.; FONSECA, Antônio V.; MARQUES, Camila B.; DINIZ, Cesar G.; COSTA, Diego; MONTEIRO, Dyeden; ROSA, Eduardo R.; VÉLEZ-MARTIN, Eduardo; WEBER, Eliseu J. **Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. Remote Sensing**, v. 12, n. 17, 2020. DOI: 10.3390/rs12172735.

SMAKHTIN, Vladimir U. **Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology**, v. 240, n. 3-4, p. 147-186, 2001.

SILVA, Luiz. Fernando. Tavares. C.; Castro, Urubatan.N.; GUERRA, Antônio. José. T.; LIMA, Fábio. S.; MENDES, Stella. P.; BEZERRA, José. Fernando. R. **Degradação ambiental em áreas destinadas à pecuária na sub-bacia hidrográfica do rio Sana, Macaé-RJ.** Revista de Geografia (Recife), v. 29, p. 45-59, 2012.

SILVA, R. O. B. da; Montenegro, S. M. G. L.; Souza, W. M. de. **Tendências climáticas nos registros de caudais de uma rede hidrológica de referência no sul de Espanha.**

TOMER, Mark D.; SCHILLING, Keith E. **A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology. Journal of Hydrology**, v. 376, n. 1-2, p. 24-33, 2009.

TRAN, Liem T.; O'NEILL, Robert V. **Detecting the effects of land use/land cover on mean annual streamflow in the Upper Mississippi River Basin, USA.** Journal of Hydrology, v. 499, p. 53-63, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.041>. Acesso em: 30 jul. 2024.

TSCHIEDEL, Arthur. F.; KAYSER, Rafael. Henrique. B.; CYBIS, Luiz. Fernando. de A.; Collischonn, W. Collischoum. **Comparativo entre o modelo QUAL2K e uma metodologia simplificada de modelagem da qualidade da água integrada a um ambiente de sistema de informações geográficas: estudo de caso na bacia do Rio Macaé.**

TUCCI, C. E. M. (2007). **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Acesso em: 22 jun. 2024.

ULIANA, Eduardo. M.; SILVA, David. D. DA; ULIANA, Estevão. M.; RODRIGUES, Beatriz. S.; CORRÊDO, Lucas. de P. **Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: uso de teste estatístico não paramétrico.** Revista Ambiente e Água, doi: 10.4136/ambi-água.1427, Recebido: 16 jun. 2014; Aceito: 07 nov. 2014.

VILLAS BOAS, Guilherme. H.; MIRANDA, Thalita. Garrido. X.; MARÇAL, Mônica. DOS S.; OLIVEIRA, Ana. Franco. de. **Caracterização Morfométrica da Bacia do Rio Macaé (RJ).**

WARD, A. D., & Trimble, S. W. (2004). **Environmental Hydrology.** Lewis Publishers.

YESTE, Pedro; DORADOR, Javier; MARTIN-ROSALES, Wilfredo; MOLERO, Emilio; ESTEBAN-PARRA, Maria Jose; RUEDA, Francisco Javier. **Climate-driven trends in the streamflow records of a reference hydrologic network in Southern Spain.** Journal of Hydrology, v. 567, p. 803-814, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.063>. Acesso em: 30 jul. 2024.

