

POTENCIAL IMPACTO DOS MODOS DE VARIABILIDADE E MUDANÇA DO CLIMA NA DISPONIBILIDADE HIDRÍCA DO SISTEMA IMUNANA-LARANJAL.

RESUMO

Este estudo analisou a variabilidade pluviométrica e os eventos extremos na bacia Guapimirim–Macacu, responsável pelo abastecimento do Sistema Imunana-Laranjal, entre 1942 e 2024. Foram utilizados dados pluviométricos da rede Hidroweb/ANA, submetidos ao preenchimento de falhas por regressão linear ($R^2 \geq 0,5$) e analisados por meio de estatística descritiva e índices climáticos do ETCCDI (PRCPTOT, RX1day, RX5day e CDD). Os resultados evidenciam elevada variabilidade interanual, ausência de tendência de redução da precipitação anual e aumento da concentração das chuvas em eventos intensos, associados à ocorrência de períodos secos consecutivos mais prolongados. Embora o volume anual permaneça relativamente estável, a reorganização temporal da precipitação aumenta a vulnerabilidade do Sistema Imunana-Laranjal, que depende diretamente da disponibilidade hídrica superficial e não dispõe de reservatórios de regularização. Os resultados reforçam a necessidade de medidas estruturais e de gestão voltadas ao fortalecimento da segurança hídrica regional.

Palavras-chave: Variabilidade Climática; Segurança Hídrica; ETCCDI; Sistema Imunana-Laranjal.

INTRODUÇÃO

A evolução no modo de vida da sociedade intensificou o crescimento demográfico no planeta, causando pressão significativa sobre a demanda de recursos naturais e alterando as condições ambientais. Entre essas pressões destaca-se o aumento da concentração de gases de efeito estufa, responsável por alterações no sistema climático global de forma diferenciada em distintas regiões do planeta e pelo aumento da temperatura média global (ANA, 2016).

A inter-relação entre mudanças climáticas e segurança hídrica exerce impacto direto sobre a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos. Alterações nos padrões de precipitação favorecem a ocorrência de eventos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas, comprometendo a disponibilidade de água para o abastecimento público, a manutenção das atividades econômicas e a conservação dos ecossistemas. Nesse contexto, a adoção de políticas de gestão integrada dos recursos hídricos torna-se essencial para aumentar a resiliência frente às variabilidades climáticas (PEREIRA; RODRIGUES, 2022).

A segurança hídrica é caracterizada pela disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes para atender às necessidades humanas, às atividades econômicas e à conservação dos ecossistemas aquáticos, além da capacidade de reduzir os riscos associados a cheias e secas (ANA, 2019). Dessa forma, compreender a variabilidade espaço-temporal da precipitação constitui etapa fundamental para subsidiar o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos.

A Bacia Hidrográfica Guapimirim–Macacu, localizada na porção leste do estado do Rio de Janeiro, constitui uma das principais áreas produtoras de água do Sistema Imunana-Laranjal, responsável pelo abastecimento de municípios da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Inserida em uma região de clima tropical úmido, apresenta elevada variabilidade pluviométrica e forte influência da topografia sobre a distribuição das chuvas, fatores que condicionam diretamente a dinâmica hidrológica da bacia e a disponibilidade hídrica regional (PEREIRA; ALMEIDA; SILVA, 2017).

Apesar de sua importância estratégica para a segurança hídrica regional, ainda são limitados os estudos baseados em séries históricas pluviométricas de longa duração que permitam compreender as alterações no regime de precipitação e seus impactos sobre a disponibilidade hídrica do Sistema Imunana-Laranjal. A análise dessas séries históricas possibilita identificar tendências, padrões sazonais e eventos extremos, fornecendo informações essenciais para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos em um cenário de mudanças climáticas.

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo analisar a variabilidade pluviométrica e os eventos extremos na Bacia Hidrográfica Guapimirim–Macacu, no período de 1942 a 2024, utilizando séries históricas observadas para avaliar alterações no regime de precipitação e suas implicações para a segurança hídrica do Sistema Imunana-Laranjal.

MATERIAIS E METODOS

Foram utilizados dados diários de precipitação obtidos no sistema Hidroweb/ANA para a bacia Guapimirim–Macacu. Das 22 estações identificadas, 10 apresentaram séries consistentes para análise. A estação 2242014 foi adotada como principal por apresentar maior continuidade temporal. As lacunas existentes foram preenchidas por regressão linear utilizando as estações 2242015, 2242090 e 2242095,conforme a tabela 1, adotando-se coeficientes de determinação iguais ou superiores a 0,5, de acordo com Portuguez-Martua et al. (2022).



Após a consolidação da série histórica (1942–2024), foram realizadas análises estatísticas da precipitação anual e mensal, complementadas pelos índices climáticos PRCPTOT, RX1day, RX5day e CDD, recomendados pelo ETCCDI para avaliação da intensidade e persistência de eventos extremos.

Tabela 1- Dados resultantes da comparação entre a estação principal e estações secundarias por regressão linear

Estações comparadas	Equação linear	R^2
2242014-2242015	y=0,67x+1,11	0,55
2242014-2242016	y=0,40x+2,12	0,25
2242014-2242013	y=0,54x+1,80	0,34
2242014-2242030	y=0,48x+3,10	0,14
2242014-2242043	y=0,58x+2,98	0,3
2242014-2242090	y=0,96x+0,38	0,82
2242014-2242092	y=0,46x+1,21	0,4
2242014-2242095	y=0,69x+1,16	0,56
2242014-2242096	y=0,49x+1,36	0,46

Fonte:Autor.(2025)

RESULTADOS

A análise da série histórica (1942–2024) evidencia um regime pluviométrico tipicamente úmido, com média anual em torno de 1.568 mm, porém com alta variabilidade interanual (desvio padrão ≈ 548 mm), indicando forte irregularidade na distribuição das chuvas ao longo dos anos, como demonstrado na Figura 1.

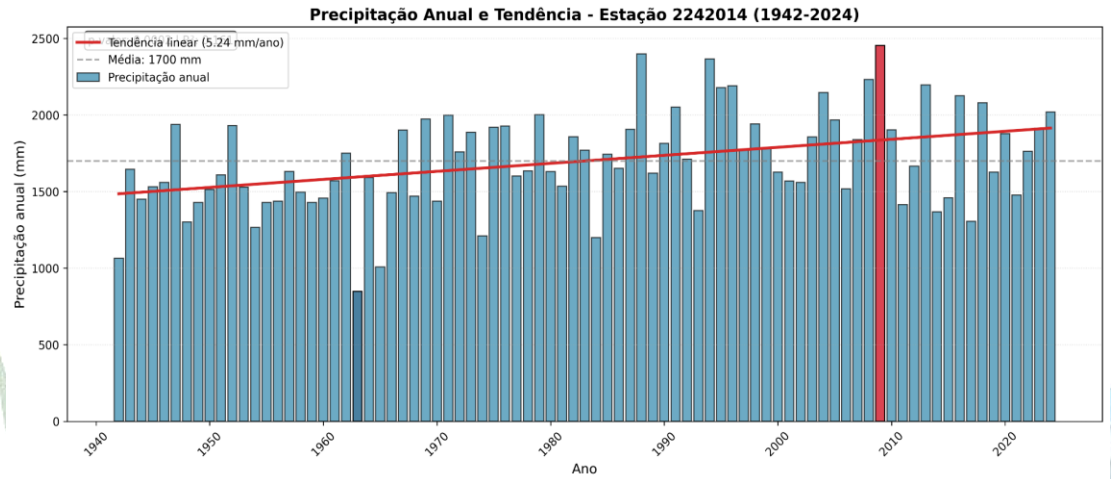


Figura 1- Gráfico de precipitação anual para o período de 1942-2024, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.

Fonte: Autor (2026)

Apesar dessa variabilidade, não se observa tendência clara de modificação dos totais anuais, o que indica estabilidade no volume precipitado ao longo do tempo. No entanto, essa estabilidade quantitativa contrasta com mudanças na forma de ocorrência da precipitação, evidenciadas pelos índices de extremos.O índice RX1day(Figura 2) apresenta média anual de aproximadamente 83 mm, com eventos extremos atingindo até 168 mm em um único dia, evidenciando episódios de alta intensidade. De forma complementar, o RX5day(Figura 3) apresenta média de 157 mm, com máximos superiores a 300 mm, indicando acumulados expressivos em curtos períodos. Esses resultados demonstram que parte significativa da precipitação anual ocorre de forma concentrada, o que é reforçado pela análise dos períodos secos.

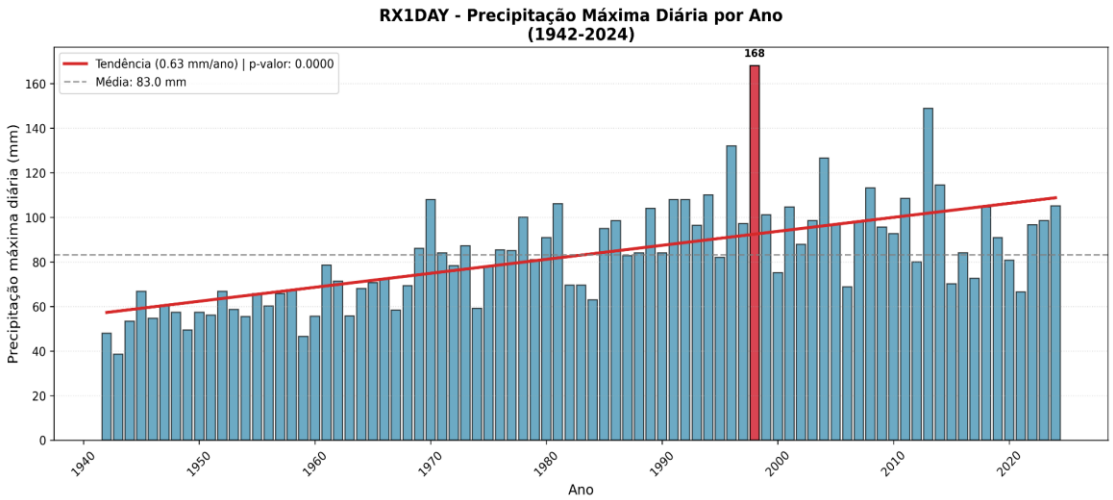


Figura 4- Índice RX1day (máxima precipitação em 1 dia) para o período de 1942–2024, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.



Fonte: Autor (2026)

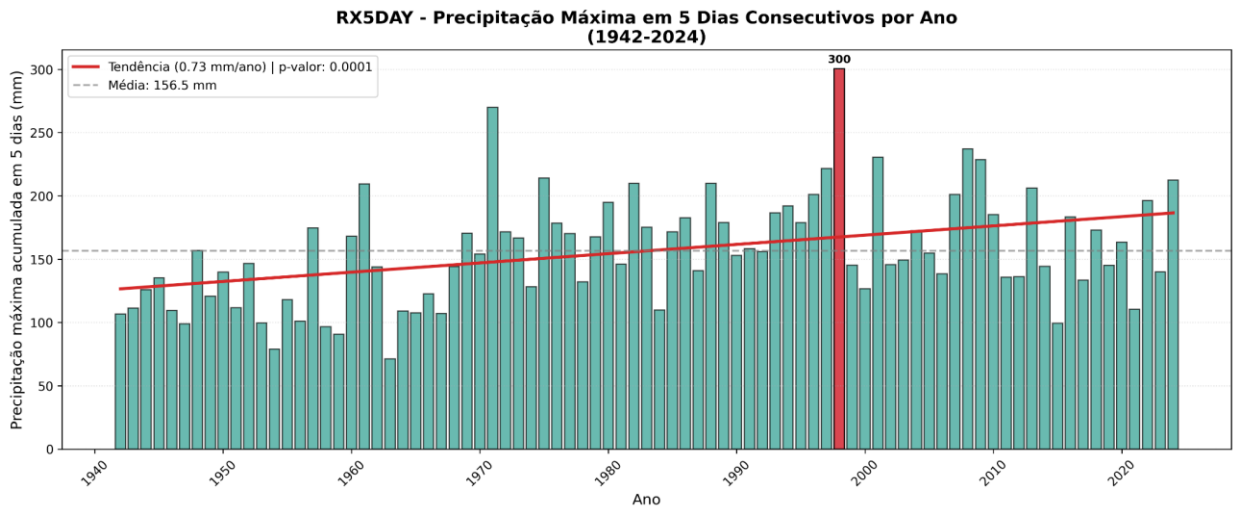


Figura 5- Índice RX5day (máxima precipitação acumulada em 5 dias consecutivos) para o período de 1942–2024, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.
Fonte: Autor (2026)

Nos meses de outono (abril e maio), verifica-se uma redução gradual dos volumes precipitados e da variabilidade. Durante o inverno (junho a agosto), os valores são significativamente mais baixos, com medianas próximas de zero e menor dispersão, evidenciando o período mais seco do ano.

A partir da primavera (setembro a novembro), há retomada progressiva das chuvas, com aumento da variabilidade e ocorrência de outliers, sinalizando o início do período chuvoso. Esse comportamento está alinhado com o padrão climático regional e reforça a dependência do sistema hídrico do período chuvoso.

O índice CDD (dias secos consecutivos) apresenta média de aproximadamente 21 dias, podendo ultrapassar 40 dias, indicando ocorrência de períodos prolongados sem chuva, mesmo em um regime climático considerado úmido. Esse padrão — alternância entre eventos intensos e períodos secos prolongados — evidencia uma maior irregularidade intra-anual, com impactos diretos na dinâmica hídrica.

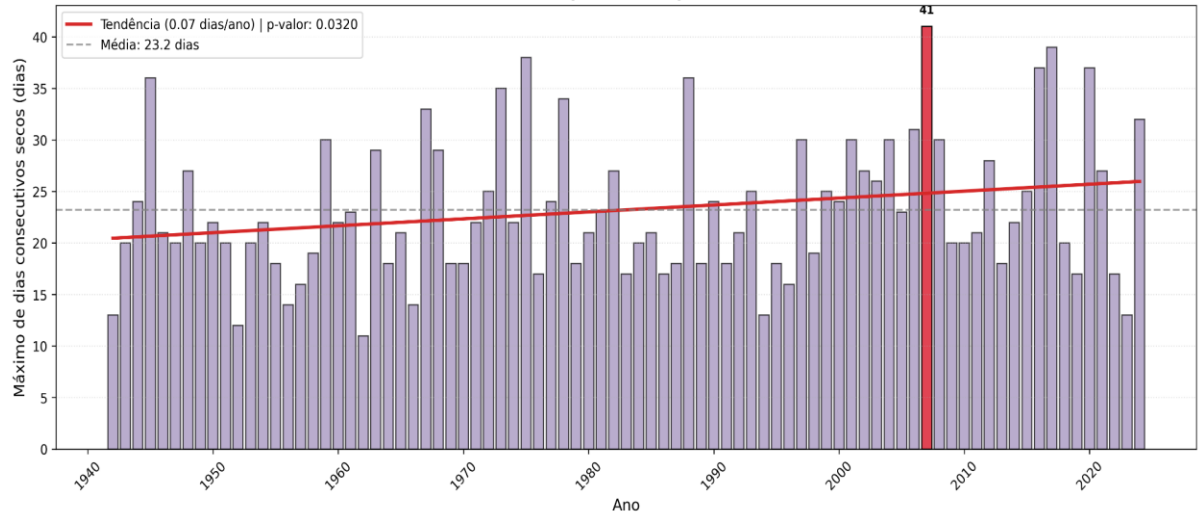


Figura 8- Índice CDD (máximo de dias consecutivos secos) para o período de 1942–2024, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.
Fonte:Autor.

Mesmo sem redução do volume total precipitado, a concentração das chuvas em poucos eventos reduz a eficiência do armazenamento natural e aumenta as perdas por escoamento superficial. Esse comportamento, pode evidenciar a vulnerabilidade do sistema frente à ausência de infraestrutura adequada para reserva e armazenamento de água.

Para além da duração dos períodos secos, a análise do número anual de dias com chuva (Figura 8) revela um aspecto complementar e igualmente relevante: embora o volume total precipitado não apresente redução significativa ao longo da série histórica, observa-se uma tendência de concentração da chuva em menos dias por ano. Entre 1940 e 2023, o número médio anual de dias com precipitação superior a 0,1 mm foi de aproximadamente 140 dias, com oscilações interanuais que atingem mínimos próximos a 110 dias e máximos em torno de 165 dias. Essa redução na frequência dos eventos chuvosos, associada à manutenção ou mesmo ao aumento da intensidade dos extremos (RX1day e RX5day), indica que a mesma quantidade anual de precipitação vem ocorrendo de forma mais concentrada e torrencial. Tal comportamento reduz a eficiência da infiltração e do recarga de aquíferos, ao mesmo tempo em que amplia o escoamento superficial e os riscos de alagamentos e enchentes nos trechos de baixada da bacia do Guapimirim-Macacu.

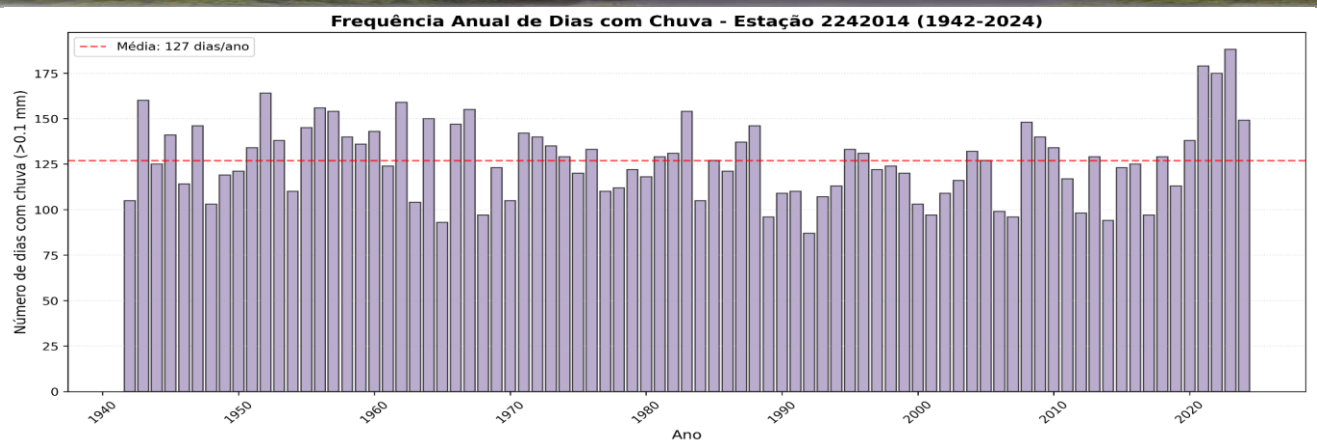


Figura 9 – Número anual de dias com chuva (>0,1 mm) para o período de 1940–2023, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.
Fonte: Autor (2026)

Em síntese, os resultados indicam que a segurança hídrica do Sistema Imunana-Laranjal está ameaçada não por uma redução inequívoca da precipitação total anual, mas por uma reorganização do regime pluviométrico caracterizada por: (i) maior intensidade dos eventos extremos (RX1day e RX5day); (ii) redução do número de dias com chuva; (iii) alternância de ciclos plurianuais secos e úmidos; e (iv) manutenção de períodos secos consecutivos (CDD) que podem ultrapassar 40 dias. Esse conjunto de transformações aponta para a necessidade de adoção de medidas estruturais (como pequenas barragens de regularização ou sistemas de aproveitamento de águas pluviais) e não estruturais (como sistemas de alerta hidrológico e gestão integrada da demanda), de modo a aumentar a resiliência do sistema frente às incertezas climáticas futuras.

CONCLUSÔES

Conclui-se que o regime pluviométrico da Bacia Guapimirim-Macacu, no período de 1942 a 2024, não apresentou redução significativa do volume total anual de precipitação, que se manteve em torno de 1.568 mm, porém com elevada variabilidade interanual (desvio padrão de 548 mm), indicando que a segurança hídrica do Sistema Imunana-Laranjal está ameaçada não pela escassez quantitativa da chuva, mas por uma profunda reorganização do seu padrão de ocorrência.

Adicionalmente, os índices de extremos climáticos (ETCCDI) revelaram transformações expressivas: o RX1day atingiu máximos de 168 mm em um único dia e o RX5day superou 300 mm em cinco dias consecutivos, enquanto o número anual de dias com chuva apresentou tendência de redução, aproximando-se de 110 dias em alguns anos, o que significa que o mesmo volume pluviométrico está cada vez mais concentrado em poucos eventos torrenciais.

Observa-se ainda que o índice CDD registrou média de 21 dias consecutivos sem chuva, podendo ultrapassar 40 dias, evidenciando a ocorrência de veranicos prolongados mesmo em um regime climaticamente úmido, e que a média móvel de 12 meses identificou ciclos plurianuais de 4 a 6 anos, com períodos críticos abaixo da média histórica nas décadas de 1970, meados de 1980 e no triênio 2012-2014, o que impõe grande desafio à gestão de recursos hídricos em sistemas sem reservação significativa.

Nesse contexto, o impacto direto sobre o Sistema Imunana-Laranjal é preocupante: a concentração das chuvas em poucos eventos extremos reduz a infiltração e a recarga dos aquíferos, amplia o escoamento superficial e os riscos de alagamentos nas áreas de baixada, enquanto os longos períodos secos consecutivos aumentam a demanda sobre a captação em momentos de menor disponibilidade hídrica, vulnerabilidade esta agravada pela ausência de reservatórios de regularização no sistema.

Diante desse cenário, fazem-se necessárias medidas estruturais, como o estudo de viabilidade de pequenas barragens de regularização ou sistemas de aproveitamento de águas pluviais, medidas não estruturais, como a implementação de sistemas de alerta hidrológico com base em previsões sazonais e a gestão integrada da demanda, além do aprofundamento científico da correlação entre os índices de precipitação e os modos de variabilidade climática (ENOS, Dipolo do Atlântico) para aprimorar a previsibilidade de ciclos secos e úmidos.

REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE AGUAS. *Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação* / Agência Nacional de Águas. – Brasília: ANA, GGES, 2016 93 p. : il. ISBN: 978-85-8210-033-2

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Plano Nacional de Segurança Hídrica. Brasília*: ANA, 2019. 112 p. ISBN 978-85-8210-059-2. Disponível em: www.ana.gov.br. Acesso em: 15 de mai 2025.

PEREIRA, V. C. R.; ALMEIDA, C. N.; SILVA, T. M. Diagnóstico Hidrogeoquímico na Bacia do Guapimirim-Macacu (RJ). *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, Rio de Janeiro, v. 40, n. 3, p. 82-93, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.11137/2017_3_82_93. Acesso em: 22 de maio de 2025.

PEREIRA, Vania Rosa; RODRIGUES, Daniel Andrés.Vulnerabilidades da segurança hídrica no Brasil frente às mudanças climáticas. Derbyana, São Paulo, 43: e777, 2022. Disponível em: https://revistaig.emnuvens.com.br/derbyana/article/view/777/764 Acesso em: 10 out. 2024.