

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E ENERGIA – PPGC&E**

LYNDA SHÉRYLLIN CABOCLO VIANA

**MODELAGEM ESTATÍSTICA DE PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS E SUA RELAÇÃO**  
**COM OS NÍVEIS DA LAGOA IMBOASSICA, MACAÉ-RJ**

MACAÉ-RJ, 2025

LYNDA SHÉRYLLIN CABOCLO VIANA

**MODELAGEM ESTATÍSTICA DE PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS E SUA RELAÇÃO  
COM OS NÍVEIS DA LAGOA IMBOASSICA, MACAÉ-RJ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Clima e Energia.

**Orientadora:** Profa. Dra. Eliane Barbosa Santos

MACAÉ-RJ, 2025

### **FICHA CATALOGRÁFICA**

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

V614

Viana, Lynda Shéryllin Caboclo.

"MODELAGEM ESTATÍSTICA DE PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS E SUA RELAÇÃO COM OS NÍVEIS DA LAGOA IMBOASSICA, MACAÉ-RJ" / Lynda Shéryllin Caboclo Viana. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.

75 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Clima e Energia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2025.

Orientadora: Eliane Barbosa Santos.

1. eventos extremos. 2. período de retorno. 3. recursos hídricos. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 123

**MODELAGEM ESTATÍSTICA DE PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS E SUA RELAÇÃO  
COM OS NÍVEIS DA LAGOA IMBOASSICA, MACAÉ-RJ**

LYNDA SHÉRYLLIN CABOCLO VIANA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Clima e Energia.

**Aprovado em 18/09/2025**

Comissão Examinadora:

---

Profa. Dra. Eliane Barbosa Santos - UENF (Orientadora)

---

Prof. Dr. Nivaldo Silveira Ferreira - UENF

---

Prof. Dr. Jader Lugon Junior – IFF

---

Prof. Dr. Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira - UFRJ

MACAÉ-RJ, 2025

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo desta jornada. Ao meu esposo, Victor de Souza Fernandes, pelo amor, apoio e paciência em todos os momentos. À minha família, pelo incentivo constante e pela base sólida que me sustenta.

À minha orientadora, Profa. Dra. Eliane Barbosa Santos, pela dedicação, orientação e ensinamentos valiosos que contribuíram de forma essencial para a realização desta pesquisa.

Ao pesquisador Gildo Rafael de Almeida Santana, pela colaboração na pesquisa e pela elaboração dos mapas, que contribuíram de maneira significativa para a qualidade da análise apresentada.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia (PPGC&E), pela transmissão de conhecimento e contribuições para minha formação acadêmica, e aos funcionários do prédio, pelo suporte diário. Aos colegas de classe, pelo companheirismo, pelas trocas de experiências e pelo apoio mútuo durante todo o curso.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), pela oportunidade de formação, e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo apoio financeiro concedido por meio do projeto “Monitoramento de Eventos Climáticos Extremos no Estado do Rio de Janeiro” (Processo SEI-260003/001746/2025).

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e à Secretaria Municipal de Ambiente e Sustentabilidade de Macaé (SEMAS), pela disponibilização dos dados que possibilitaram a execução deste estudo.

## RESUMO

O aumento da frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos, como as precipitações intensas, representa um desafio global associado às mudanças climáticas. A Bacia Hidrográfica da Lagoa de Imboassica, localizada em Macaé-RJ, é particularmente vulnerável a esses eventos, que frequentemente resultam em transbordamentos, danos à infraestrutura e alterações ambientais. Nesse contexto, torna-se essencial compreender a dinâmica das precipitações máximas e sua influência sobre os níveis da Lagoa. O objetivo principal deste trabalho foi analisar a relação entre os eventos de precipitação máxima e os níveis da Lagoa de Imboassica, além de estimar os períodos de retorno e os valores associados às precipitações extremas por meio de modelagem estatística, utilizando a Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV). Foram utilizados dados diários de precipitação (2007–2024) da estação A608 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e dados de nível da lagoa (2015–2023) fornecidos pela Secretaria Municipal de Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS) de Macaé. A análise desenvolvida neste estudo contemplou: (i) análise exploratória das séries temporais de precipitação e nível da lagoa; (ii) a identificação de eventos extremos por meio do método dos blocos máximos; (iii) a aplicação de correlação simples, correlação cruzada e regressão linear simples para avaliar a relação entre a precipitação e os níveis da Lagoa de Imboassica; (iv) o ajuste da distribuição GEV às precipitações máximas diárias; e (v) a verificação da aderência do modelo por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov. A análise da precipitação acumulada, tanto diária quanto mensal, indica uma predominância de chuvas mais frequentes e intensas durante o verão. Essa sazonalidade se reflete diretamente nos níveis da Lagoa de Imboassica, que oscilaram entre 0 cm e 150 cm. Os episódios de nível zero ocorrem pontualmente, associados à abertura do canal extravasor e abertura da barra da lagoa. A correlação cruzada revelou resposta rápida da lagoa à precipitação, com associações significativas ao nível de 5% no mesmo dia e em defasagens de até quatro dias, sendo a correlação simultânea (do mesmo dia) mais expressiva. A regressão linear, aplicada aos dois maiores eventos anuais de precipitação, confirmou essa influência direta, com maior impacto no próprio dia ( $R^2 = 0,35$ ). A modelagem estatística por meio da distribuição GEV permitiu estimar os níveis e períodos de retorno das precipitações máximas, com os maiores valores no verão para os períodos de retorno de 2, 5 e 10

anos, com estimativas de 73,0 mm (2 anos) a 146,6 mm (10 anos). O teste de Kolmogorov-Smirnov confirmou a adequação do modelo ao nível de 5% de significância. Os resultados reforçam a vulnerabilidade da bacia diante das mudanças climáticas e destacam a importância de estratégias de gestão hídrica e ordenamento territorial que promovam adaptação e resiliência frente aos eventos extremos.

**Palavras-chave:** eventos extremos; período de retorno; recursos hídricos.

## ABSTRACT

The increase in the frequency and intensity of extreme weather events, such as heavy rainfall, represents a global challenge associated with climate change. The Imboassica Lagoon Watershed, located in Macaé, Rio de Janeiro, is particularly vulnerable to these events, which often result in flooding, damage to infrastructure, and environmental changes. In this context, it is essential to understand the dynamics of maximum rainfall and its influence on the lagoon's water levels. The main objective of this study was to analyze the relationship between maximum precipitation events and the levels of the Imboassica Lagoon, in addition to estimating the return periods and values associated with extreme precipitation through statistical modeling, using the Generalized Extreme Value Distribution (GEV). Daily precipitation data (2007–2024) from station A608 of the National Institute of Meteorology (INMET) and lagoon level data (2015–2023) provided by the Municipal Secretariat for the Environment and Sustainability (SEMAS) of Macaé were used. The analysis developed in this study included: (i) exploratory analysis of the precipitation and lagoon level time series; (ii) identification of extreme events using the maximum block method; (iii) the application of simple correlation, cross-correlation, and simple linear regression to assess the relationship between precipitation and Imboassica Lagoon levels; (iv) the adjustment of the GEV distribution to precipitation; and (v) verification of model adherence using the Kolmogorov-Smirnov test. Analysis of accumulated precipitation, both daily and monthly, indicates a predominance of more frequent and intense rainfall during the summer. This seasonality is directly reflected in the levels of the Imboassica Lagoon, which fluctuated between 0 cm and 150 cm. Zero-level episodes occur sporadically, associated with the opening of the overflow channel and the opening of the lagoon bar. Cross-correlation revealed a rapid response of the lagoon to precipitation, with significant associations at the 5% level on the same day and at lags of up to four days, with simultaneous correlation (on the same day) being more significant. Linear regression, applied to the two largest annual precipitation events, confirmed this direct influence, with the greatest impact on the same day ( $R^2 = 0.35$ ). Statistical modeling using the GEV distribution allowed us to estimate the levels and return periods of maximum precipitation, with the highest values in the summer for return periods of 2, 5, and 10 years, with estimates ranging from 73.0 mm (2 years) to 146.6 mm (10 years). The Kolmogorov-Smirnov test confirmed the adequacy of the model at a 5%

significance level. The results reinforce the vulnerability of the basin to climate change and highlight the importance of water management and land use planning strategies that promote adaptation and resilience to extreme events.

**Keywords:** extreme events; return period; water resources.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa hipsométrico da BH da Lagoa de Imboassica. ....	23
<b>Figura 2.</b> Evolução do uso e ocupação das terras na BH da Lagoa de Imboassica nos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023. ....	24
<b>Figura 3.</b> Mapa da hidrografia e da localização da área de estudo, destacando a posição da estação meteorológica do INMET e o ponto de instalação da régua utilizada para o monitoramento do nível da Lagoa de Imboassica. ....	25
<b>Figura 4.</b> Vista da Lagoa de Imboassica, com destaque para a régua de medição utilizada para o monitoramento do nível da água. ....	26
<b>Figura 5.</b> Boxplot por mês da: a) Precipitação acumulada diária em dias úmidos (precipitação > 1) e b) Precipitação acumulada mensal, para o período de 2007 a 2024. ....	30
<b>Figura 6.</b> Boxplot por estação do ano da: a) Precipitação acumulada diária em dias úmidos (precipitação > 1) e b) Precipitação acumulada mensal, para o período de 2007 a 2024. ....	31
<b>Figura 7.</b> Série temporal (2007 a 2024) da precipitação acumulada diária em dias úmidos (precipitação > 1) da estação meteorológica localizada em Macaé-RJ, com destaque para os valores máximos anuais. ....	32
<b>Figura 8.</b> Distribuição dos dados do nível da lagoa de Imboassica com linha de densidade (em vermelho), por estação do ano, para o período de 2015 a 2023. ....	33
<b>Figura 9.</b> Série temporal (2015 a 2023) do nível da Lagoa de Imboassica, com destaque para os valores máximos anuais. ....	35
<b>Figura 10.</b> Correlação cruzada entre a precipitação e o nível da Lagoa de Imboassica, para o período de 2015 a 2023. ....	36
<b>Figura 11.</b> Matriz de correlação entre o nível da lagoa e a precipitação diária: a) Séries temporais filtradas (nível da lagoa $\neq$ 0) e b) Top 2 precipitações diárias anuais vs. nível da lagoa. ....	37
<b>Figura 12.</b> Relação entre o nível da Lagoa de Imboassica e os dois eventos de máximos anuais de precipitação diária, nos lags de 0, 1 e 2 dias. ....	38
<b>Figura 13.</b> Estimativas dos níveis de retorno para precipitações máximas. A linha azul central representa a média estimada para cada período de retorno, enquanto as linhas cinzas indicam os intervalos de confiança de 95%. Os círculos abertos correspondem aos valores observados. ....	42

**Figura 14.** Estimativas de períodos de retorno para precipitações máximas (níveis de retorno), para as quatro estações do ano: Verão (DJF), Outono (MAM), Inverno (JJA) e Primavera (SON).....45

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Registros do nível da lagoa associados aos dois eventos de máximos anuais de precipitação diária, considerando até dois dias após o evento. ....	39
<b>Tabela 2.</b> Registros de precipitação associados aos dois eventos de máximos anuais do nível da lagoa, considerando defasagens de 0 a 4 dias.....	41
<b>Tabela 3.</b> Registros dos eventos de precipitações cuja intensidade igualou ou superou os limiares estimados para os períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos. ....	43
<b>Tabela 4.</b> Estimativas dos níveis de precipitação máxima diária para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos. ....	44
<b>Tabela 5.</b> Resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov aplicado às distribuições GEV nas análises anual e sazonal. ....	46

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ASAS – Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

BH – Bacia Hidrográfica

CCM – Complexos Convectivos de Mesoescala

DJF – Dezembro, Janeiro e Fevereiro

GPD – Distribuição Generalizada de Pareto

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

JJA – Junho, Julho e Agosto

LI – Linhas de Instabilidade

MAM – Março, Abril e Maio

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OMM – Organização Meteorológica Mundial

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

RH VIII – Região Hidrográfica VIII

SEMAS – Secretaria Municipal de Ambiente e Sustentabilidade

SON – Setembro, Outubro e Novembro

SCM – Sistemas Convectivos de Mesoescala

TVE – Teoria dos Valores Extremos

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
1.1 Objetivos.....	15
1.2 Estrutura do trabalho.....	16
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	17
2.1 Climatologia da precipitação na região.....	17
2.2 Precipitações extremas e seus impactos na região.....	18
2.3 Modelagem estatística de valores extremos.....	19
3. METODOLOGIA.....	22
3.1 Caracterização da área de estudo.....	22
3.2 Dados observados.....	24
3.3 Análise estatística e identificação de eventos extremos.....	26
3.4 Relação entre as precipitações máximas e os níveis da Lagoa de Imboassica.....	27
3.5 Teoria dos Valores Extremos (TVE) .....	28
3.5.1 Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV).....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
4.1 Análise exploratória da precipitação acumulada diária e mensal .....	30
4.2 Análise exploratória do nível da Lagoa de Imboassica.....	33
4.3 Relação entre o nível da Lagoa de Imboassica e a precipitação acumulada diária.....	36
4.4 Modelagem das precipitações máximas usando a distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV).....	42
5. PRODUTO TECNOLÓGICO .....	47
6. CONCLUSÃO .....	48
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50
APÊNDICE A – SCRIPT R.....	56

## 1. INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos, como ondas de calor, tempestades, secas e chuvas intensas, acarretam grandes impactos, desde danos à infraestrutura até riscos à vida humana. De acordo com o sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), esses extremos climáticos estão ocorrendo simultaneamente, causando impactos em cascata cada vez mais difíceis de administrar. Diante desse cenário, compreender suas causas, frequência e intensidade é fundamental para antecipar riscos e construir respostas mais eficazes frente às mudanças climáticas.

A intensificação dos eventos climáticos extremos, agravada pelas mudanças climáticas em curso, representa uma ameaça crescente para diversas regiões do planeta (IPCC, 2022). No Brasil, estudos apontam que o Sudeste é particularmente vulnerável a esses fenômenos. Kuroki *et al.* (2022) identificaram uma correlação entre variabilidade climática e vulnerabilidade social no Sudeste, destacando que chuvas persistentes aumentam os riscos em áreas urbanas e comprometem a capacidade de resposta da população. Esse cenário exige atenção especial ao planejamento urbano e à gestão de riscos climáticos.

No setor agropecuário, os impactos das mudanças no regime de chuvas também são significativos. Conforme Assad e Assad (2024), alterações na distribuição das precipitações afetam diretamente a produtividade agrícola, exigindo medidas de adaptação e mitigação para garantir a segurança alimentar. Diante desses desafios, torna-se essencial reforçar o compromisso com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 13 - Ação contra a mudança global do clima, que propõe ações urgentes para enfrentar os efeitos da crise climática.

Na Bacia Hidrográfica (BH) da Lagoa de Imboassica, que inclui os territórios dos municípios de Macaé e Rio das Ostras, no Estado do Rio de Janeiro, as chuvas intensas influenciam diretamente diversos aspectos socioeconômicos e ambientais da região. Segundo Tavares, Silva e Junior (2016) a Região Hidrográfica VIII (RH VIII), que é formada pelas bacias hidrográficas dos rios Macaé, das Ostras, da Lagoa de Imboassica e de pequenos córregos e lagoas litorâneas, destaca-se como uma região especialmente sensível aos eventos extremos de precipitação.

As chuvas intensas provocam alterações substanciais na dinâmica dos recursos hídricos. Na Lagoa de Imboassica, esses eventos têm sido associados a

transbordamentos que afetam diretamente a população da região, infraestruturas e ecossistemas, com danos às propriedades, deslocamento forçado, interrupção de serviços essenciais e riscos à segurança e saúde das comunidades afetadas (Santos; Ferreira, 2014).

As políticas públicas voltadas à gestão dos recursos hídricos são formuladas principalmente em escalas nacional e estadual. Entretanto, os impactos ambientais dessas regiões também se manifestam em escala local, onde os efeitos das mudanças climáticas, como a intensificação das chuvas e os eventos de transbordamento, têm provocado alterações nos ecossistemas e na dinâmica socioambiental (Lima, 2021). Diante do exposto e considerando a vulnerabilidade da região a eventos climáticos extremos, é fundamental analisar os padrões das precipitações máximas frente às mudanças climáticas e avaliar seus efeitos sobre a dinâmica da Lagoa de Imboassica.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi analisar a relação entre os eventos de precipitação máxima e os níveis da Lagoa de Imboassica, situada em Macaé-RJ, além de estimar os períodos de retorno e os valores associados às precipitações máximas por meio de modelagem estatística.

Os objetivos específicos são:

- Realizar uma análise exploratória das séries temporais de precipitação acumulada diária e mensal, bem como dos níveis da Lagoa de Imboassica, visando identificar padrões e variações ao longo do tempo;
- Identificar os eventos de precipitação máxima diária na região de Macaé-RJ;
- Analisar estatisticamente a correlação entre os eventos de precipitação máxima diária e as variações nos níveis da Lagoa de Imboassica;
- Aplicar a Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) para modelar as precipitações máximas diárias observadas, nas escalas anual e sazonal;
- Estimar os períodos de retorno e os níveis associados à precipitação máxima diária com base no ajuste da distribuição GEV;
- Avaliar a adequação do modelo GEV por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov.

## 1.2 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos: O Capítulo 1 apresenta a introdução, contextualizando o tema, os objetivos, a justificativa e a estrutura do trabalho. O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica, com os principais conceitos e estudos relevantes. No Capítulo 3, são descritos os procedimentos metodológicos adotados, detalhando os dados utilizados e as etapas da pesquisa. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, acompanhados da discussão. Os scripts elaborados em linguagem R, utilizados na obtenção dos resultados apresentados nesta dissertação, estão disponibilizados no Apêndice A. Ressalta-se que os principais resultados da pesquisa foram submetidos para publicação na *Revista Brasileira de Climatologia*, com a colaboração do pesquisador Gildo Rafael de Almeida Santana. O Capítulo 5 apresenta o produto tecnológico vinculado à dissertação. Por fim, o Capítulo 6 reúne as considerações finais, destacando as contribuições do estudo, suas limitações e sugestões para pesquisas futuras.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Climatologia da precipitação na região

No Estado do Rio de Janeiro, a topografia exerce um papel crucial na variação dos totais pluviométricos anuais médios, influenciando diretamente o regime de chuvas, com totais máximos nas áreas de elevada altitude e mínimos sobre as regiões de baixada e costeiras (Silva, 2014). Os maiores totais pluviométricos anuais médios encontram-se na divisa da região Metropolitana e das baixadas litorâneas com a região Serrana, com precipitação anual variando entre 2500 e 2800 mm/ano, em contraste com as áreas de baixadas litorâneas, mais próximas ao mar (entre 700 a 1300 mm/ano), e na maior parte do Norte/Noroeste Fluminense (em média 1000 mm/ano) (Silva; Dereczynski, 2014). Vale destacar que a BH da Lagoa de Imboassica inclui os territórios de dois municípios do Estado do Rio de Janeiro: Macaé (localizado no Norte do Estado) e Rio das Ostras (localizado nas baixadas litorâneas).

Segundo Dereczynski, Oliveira e Machado (2009), no Estado do Rio de Janeiro, os totais pluviométricos são mais elevados nos meses de verão. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um dos principais sistemas meteorológicos causadores de chuvas durante o verão na América do Sul, e é extremamente importante para a estação chuvosa do Sudeste do Brasil (Reboita *et al.*, 2010). A ZCAS é caracterizada por uma faixa convectiva alongada, que geralmente se forma na região amazônica e se estende em direção ao Sudeste do Brasil, alcançando o sudeste do Oceano Atlântico subtropical (Carvalho; Jones; Liebmann, 2004).

Nos meses de inverno, existe uma alta redução dos totais de precipitação no Estado do Rio de Janeiro, sendo a chuva uma consequência maior dos sistemas frontais (Silva; Dereczynski, 2014). As frentes atmosféricas se formam quando massas de ar com características distintas se encontram, gerando um forte gradiente térmico (Ferreira; Cavalcanti, 2022). De acordo com o estudo de Dereczynski, Oliveira e Machado (2009), as chuvas intensas na cidade do Rio de Janeiro, durante um período de 10 anos (janeiro de 1997 a dezembro de 2006), foram em sua maioria causadas por sistemas frontais, correspondendo a 77% dos eventos observados.

Outros sistemas, como os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) também desempenham um papel importante no regime de chuvas do Estado do Rio

de Janeiro (Siqueira; Marques, 2016). Os SCM são constituídos por um aglomerado de nuvens convectivas e apresentam áreas com contínua precipitação, sendo classificados em: Linhas de Instabilidade (LI), os que possuem forma de linha; Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), os que apresentam um formato circular ou simplesmente, SCM, os de formas irregulares (Houze, 2004; Siqueira; Marques, 2008). O sistema meteorológico Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) também é importante, pois dependendo da sua posição, pode ocasionar grandes períodos de estiagens (Reboita *et al.*, 2010).

## **2.2 Precipitações extremas e seus impactos na região**

Os desastres naturais associados às fortes precipitações são generalizados no Brasil, principalmente devido à complexa interação entre os fenômenos atmosféricos e os aspectos fisiográficos de cada região, como relevo, vegetação e proximidade com o oceano (Luiz-Silva; Oscar-Júnior, 2022). Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED UFSC, 2013), no Estado do Rio de Janeiro, os desastres hidrológicos relacionados a enxurradas e inundações são frequentes, responsáveis em grande parte pela decretação dos estados de emergência e de calamidade pública.

Segundo Tavares e Santos (2022) as regiões do Estado do Rio de Janeiro que apresentam as precipitações máximas diárias mais intensas são a Baixada Litorânea e a porção leste da região Metropolitana. Néto e Santos (2022), analisando os eventos de precipitação intensa no Estado do Rio de Janeiro, encontraram tendências estatisticamente significativas (ao nível de significância de 5%) em alguns indicadores de extremos climáticos de precipitação, que em sua maioria, foram de aumento de precipitação nas áreas das baixadas litorâneas, sudeste da região Metropolitana do Rio de Janeiro e sul do Norte Fluminense, abrangendo a região da BH da Lagoa de Imboassica. O estudo de Luiz-Silva e Oscar-Júnior (2022) também mostra que os extremos de precipitação estão se tornando cada vez mais frequentes em diversas regiões do Estado do Rio de Janeiro.

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2022), as mudanças climáticas estão contribuindo para o aumento na frequência e intensidade desses eventos extremos, causando impactos adversos, perdas e danos à natureza.

As precipitações extremas, por exemplo, podem ter impactos devastadores na sociedade, como inundações, erosão do solo e danos agrícolas, além de causar riscos e impactos indiretos à saúde (Handmer *et al.*, 2012; Crimmins *et al.*, 2016). Esses eventos também exercem impacto direto e abrangente sobre os recursos hídricos, causando alterações substanciais na dinâmica desses sistemas, especificamente, observa-se uma intensificação na vazão das bacias hidrográficas, incluindo aquelas que compõem a RH VIII (Tavares; Silva; Junior, 2016).

As enchentes têm um impacto negativo nas áreas próximas às bacias hidrográficas, constituindo uma ameaça direta à integridade das vias e residências locais (Barroso; Molisani, 2019). Além disso, o transbordamento dessas bacias pode causar danos significativos ao solo e à infraestrutura, resultando em impactos negativos de longo prazo na região (Santos; Ferreira, 2014).

Diante da iminência de enchentes causadas por fortes chuvas, a comunidade busca estratégias preventivas. Na BH da Lagoa de Imboassica, opta-se por abrir artificialmente sua barra de areia que a separa do mar, visando proteger as residências locais contra danos e prejuízos (Santos; Ferreira, 2014). No entanto, o processo de autorização para realizar essa abertura ainda é motivo de amplos debates.

A abertura da barra entre o mar e a lagoa resulta na saída de água doce, reduzindo o volume da lagoa, e na posterior entrada de água salgada, o que pode ocorrer após meses com a lagoa totalmente vazia, causando alterações abruptas na salinidade e a entrada de organismos marinhos, impactando os ecossistemas locais (Bergamin, 2020). À medida que a maré sobe, o mar contribui com o aporte de água para a lagoa, enquanto esta libera grande parte de seu volume para o oceano (Farias *et al.*, 2019). Ressalta-se que o fechamento da barra ocorre de forma natural, em aproximadamente 8 dias, o que explica o longo tempo necessário para a recuperação do sistema (Erazo, 2003).

### **2.3 Modelagem estatística de valores extremos**

Através da modelagem estatística de valores extremos de precipitação, é possível fornecer subsídios importantes para o desenvolvimento de estratégias de gestão de riscos e adaptação às mudanças climáticas. Nesse contexto, a Teoria dos Valores Extremos (TVE), que é um ramo da probabilidade que estuda o comportamento estocástico dos extremos de um conjunto de variáveis aleatórias, se

destaca. A TVE concentra-se em classes especiais de distribuições de probabilidade, sendo seus principais pilares o Teorema de Fisher-Tippett-Gnedenko, o Teorema de Pickands-Balkema-de Haan e os métodos de inferência estatística aplicados à análise de extremos.

O Teorema de Fisher-Tippett-Gnedenko (Fisher; Tippett, 1928) mostra que os máximos de amostras independentes e identicamente distribuídas convergem, sob certas condições, para uma das três distribuições limite: Gumbel, Fréchet ou Weibull, unificadas na Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV).

O Teorema de Pickands-Balkema-de Haan fundamenta o uso da Distribuição Generalizada de Pareto (GPD), que abrange as distribuições exponencial, Pareto e Beta, para modelar valores que excedem um limiar (Caires, 2016).

Os métodos de inferência estatística, como a estimação por máxima verossimilhança, os métodos bayesianos e procedimentos de verificação de ajuste, desempenham um papel fundamental na análise de valores extremos. Essas técnicas permitem estimar os parâmetros das distribuições extremas, avaliar a qualidade do modelo e quantificar incertezas associadas às previsões (Coles; Dixon, 1999).

Diversos estudos têm adotado TVE como ferramenta metodológica para a descrição e modelagem de eventos extremos de precipitação, evidenciando sua crescente aceitação na área. Exemplos incluem os trabalhos de Oliveira *et al.* (2014), Santos, Lucio e Silva (2015), Tavares e Santos (2022) e Liska, Teixeira e Mires (2023). Essa metodologia permite identificar padrões críticos, estimar períodos de retorno e avaliar riscos associados a chuvas intensas, contribuindo diretamente para o planejamento urbano, a gestão de recursos hídricos e a formulação de políticas públicas de mitigação de desastres.

No estudo de Oliveira *et al.* (2014), para a região Sul de Minas Gerais, aplicou-se a distribuição GEV às séries de precipitação máxima diária anual. Os parâmetros do modelo foram realizados por meio dos métodos dos Momentos, Máxima Verossimilhança e Momentos-L, sendo este último o que apresentou melhor desempenho estatístico segundo o teste de Filliben. A aplicação da TVE permitiu estimar os valores de precipitação associados a diferentes períodos de retorno, contribuindo para a avaliação de riscos hidrológicos em municípios como Poços de Caldas, Silvanópolis, Camanducaia e Monte Sião.

No estudo de Tavares e Santos (2022), a TVE foi aplicada por meio da distribuição GEV para estimar a precipitação máxima diária associada a diferentes

períodos de retorno. Os parâmetros da distribuição foram ajustados utilizando o método da máxima verossimilhança, e os resultados indicaram, com nível de significância de 5%, que o modelo apresentou aderência estatística satisfatória aos dados observados. Esses resultados reforçam a eficácia da GEV na modelagem de eventos extremos, especialmente em contextos de avaliação de riscos hidrológicos e planejamento preventivo.

### 3. METODOLOGIA

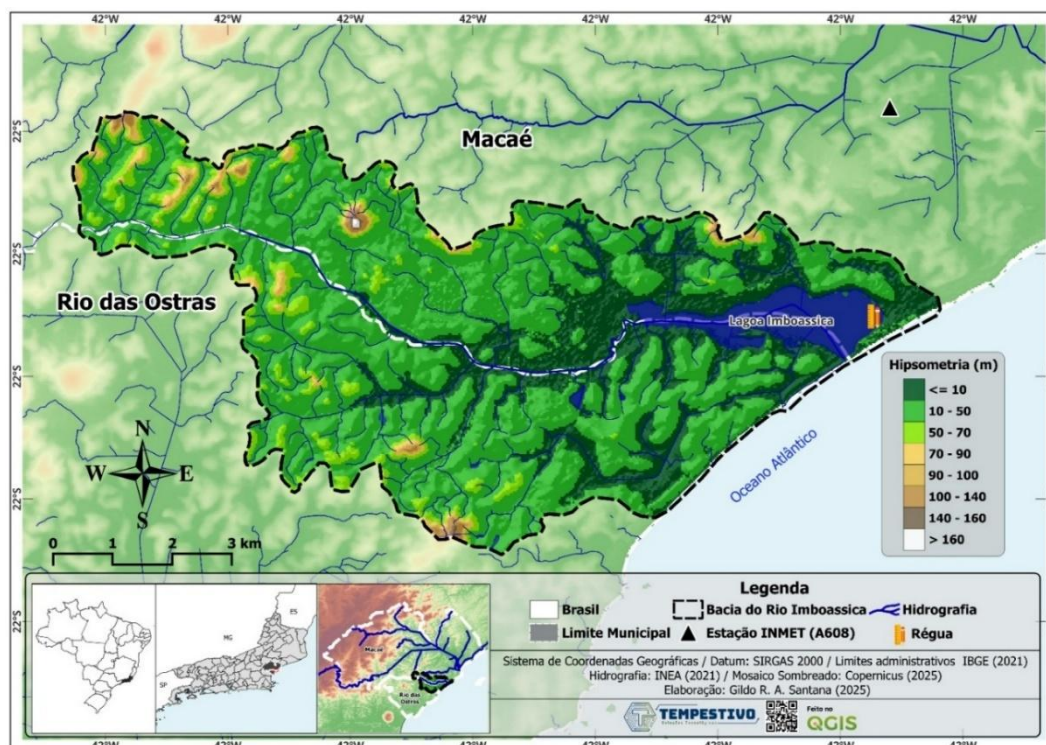
#### 3.1 Caracterização da área de estudo

A BH da Lagoa de Imboassica faz parte da RH VIII, localizada na divisa dos municípios de Macaé e Rio das Ostras no Estado do Rio de Janeiro, onde recebe a contribuição da drenagem pluvial de vários bairros de Macaé e de pequenos afluentes, além do Rio Imboassica, seu principal formador (CILSJ, 2021). A lagoa de Imboassica tem superfície de  $3,26 \times 10^6 \text{ m}^2$ , profundidade média de 1,1 m e máxima de 2,2 m, volume de  $3,56 \times 10^6 \text{ m}^3$ , perímetro de 27,6 km, comprimento máximo de 5,3 km e largura máxima de 1,3 km (Branco *et al.*, 2007).

A lagoa encontra-se separada do mar por uma barra arenosa de aproximadamente 180 m de largura (Farias *et al.*, 2019). Devido à elevada taxa de deposição de sedimentos oceânicos, que são partículas de origem continental, biológica ou química acumuladas no fundo marinho, a abertura natural desse canal é considerada pouco provável. Ainda assim, a lagoa de Imboassica tem sido ocasionalmente conectada ao oceano por meio de intervenções humanas (Santangelo *et al.*, 2007; Farias *et al.*, 2018).

A Figura 1 apresenta o mapa hipsométrico da BH da Lagoa de Imboassica, evidenciando a distribuição altimétrica da área de estudo. Observa-se uma predominância de áreas de baixa altitude, favorecendo o escoamento superficial para a lagoa. A separação da lagoa do mar por uma barra arenosa e a presença de cursos d'água indicam vulnerabilidade a processos de sedimentação e intrusão salina.

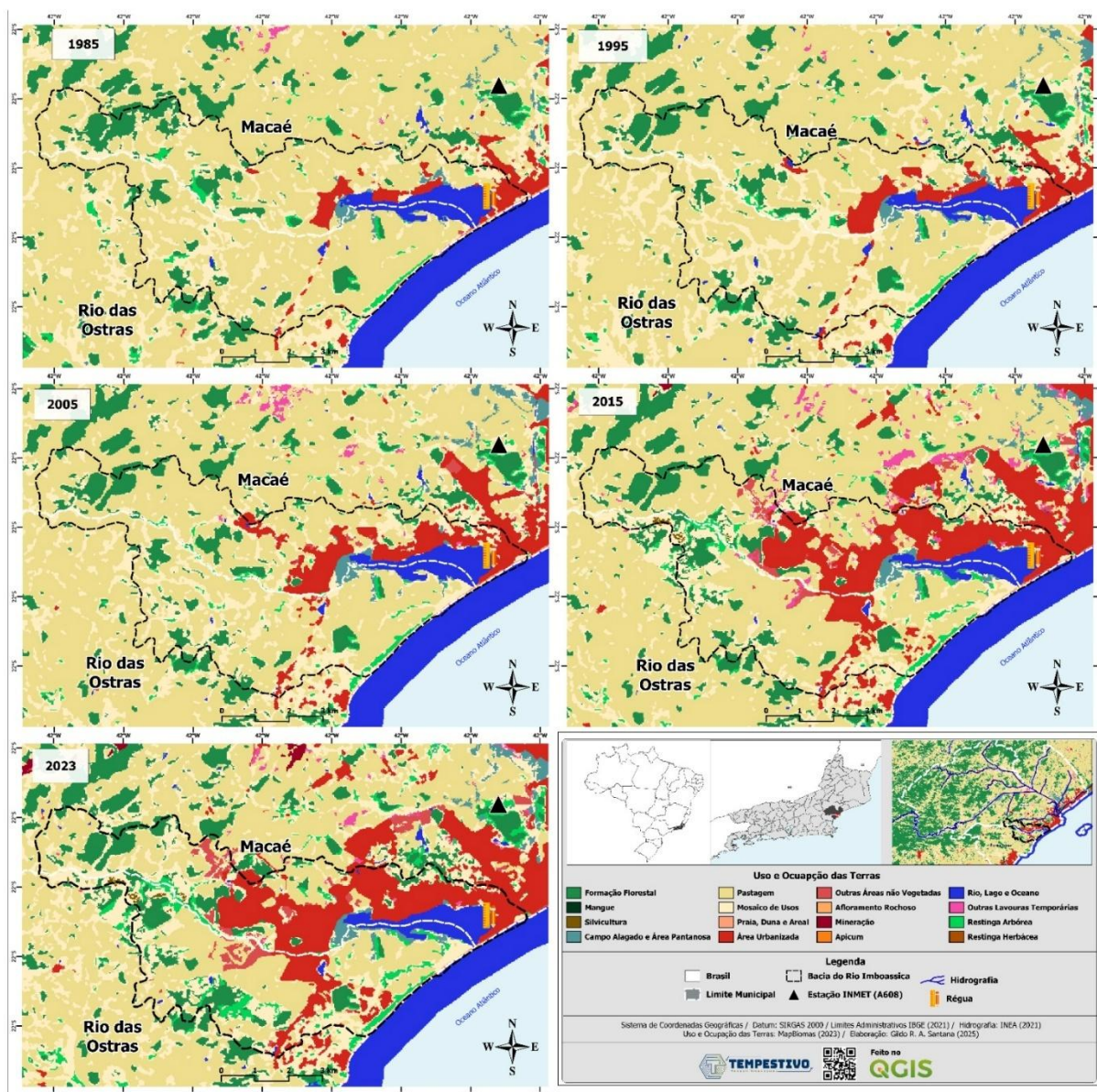
**Figura 1.** Mapa hipsométrico da BH da Lagoa de Imboassica.



**Fonte:** Viana, Santana e Santos (2025, trabalho submetido para publicação).

Estudos como o de Barreto (2009) evidenciam que a BH da Lagoa de Imboassica tem sofrido profundas transformações ao longo das últimas décadas, impulsionadas principalmente pelo crescimento urbano desordenado. Esse processo tem provocado impactos significativos na dinâmica ambiental da região, como a degradação da vegetação nativa, o comprometimento da qualidade da água e a intensificação do assoreamento. Na Figura 2, elaborada com base nos dados do MapBiomas de 2023, apresenta uma análise temporal da dinâmica de uso e ocupação das terras na BH da Lagoa de Imboassica, abrangendo os anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023. Ao longo das décadas, observa-se um crescimento expressivo das áreas urbanizadas, com destaque para o entorno da Lagoa de Imboassica. A substituição de cobertura vegetal por áreas impermeabilizadas intensifica o escoamento superficial, aumenta o risco de enchentes e compromete a qualidade da água da lagoa.

**Figura 2.** Evolução do uso e ocupação das terras na BH da Lagoa de Imboassica nos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023.



Fonte: Viana, Santana e Santos (2025, trabalho submetido para publicação).

### 3.2 Dados observados

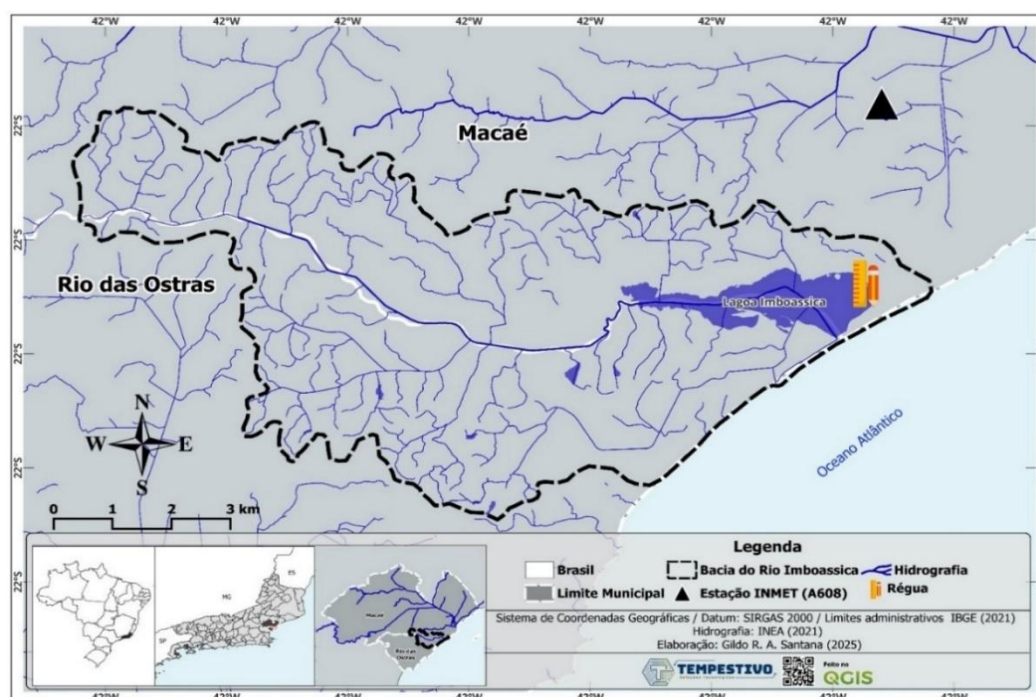
Para realizar este estudo, foram utilizados dados diários de precipitação da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), identificada pelo código A608, que entrou em funcionamento em setembro de 2006. Essa estação foi selecionada em função de sua proximidade com a Lagoa de Imboassica, permitindo uma caracterização das condições pluviométricas locais. O período analisado compreende os anos de 2007 a 2024, totalizando 18 anos de observações. Embora

esse intervalo não atenda ao padrão de 30 anos recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para estudos climatológicos de referência, ele ainda pode fornecer subsídios importantes para a identificação de padrões relevantes de precipitação. Durante esse intervalo, os dados apresentaram um percentual de falhas de aproximadamente 4,9%.

Também foram utilizados dados dos níveis da Lagoa de Imboassica, disponibilizados pela Secretaria Municipal de Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS) de Macaé, referentes ao período de 2015 a 2023. Esses dados apresentaram um percentual de falhas de aproximadamente 20,9%.

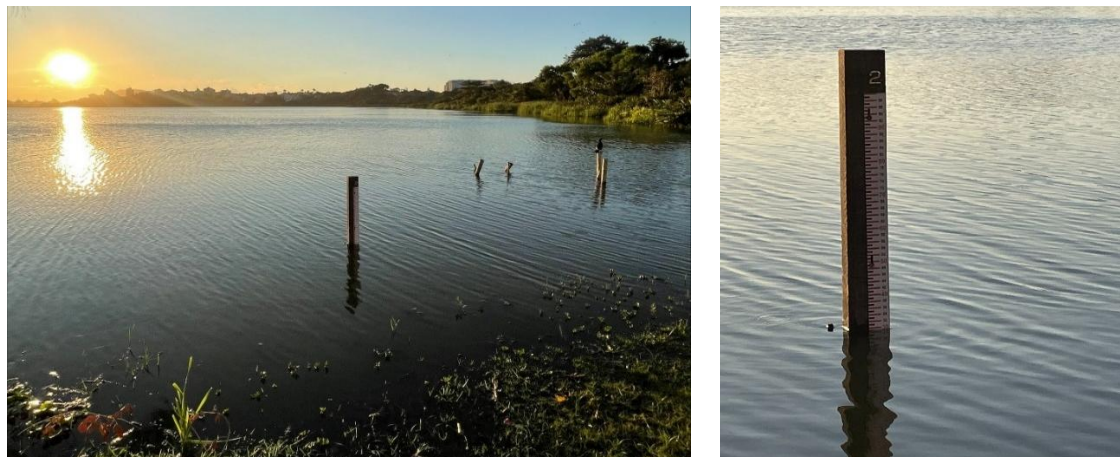
A Figura 3 apresenta a localização da estação meteorológica do INMET, posicionada nas coordenadas geográficas de longitude -41,811944 e latitude -22,376111, bem como o ponto de instalação da régua de madeira utilizada para o monitoramento do nível da lagoa. A régua possui 2 metros de altura, está fixada no interior da lagoa e encontra-se nas coordenadas: longitude -41,814592 e latitude -22,412526, conforme ilustrado na Figura 4.

**Figura 3.** Mapa da hidrografia e da localização da área de estudo, destacando a posição da estação meteorológica do INMET e o ponto de instalação da régua utilizada para o monitoramento do nível da Lagoa de Imboassica.



**Fonte:** Viana, Santana e Santos (2025, trabalho submetido para publicação).

**Figura 4.** Vista da Lagoa de Imboassica, com destaque para a régua de medição utilizada para o monitoramento do nível da água.



**Fotos:** Autoria própria (2025).

Importante ressaltar que, embora a precipitação registrada na estação meteorológica A608 não incida diretamente sobre a lagoa, os sistemas meteorológicos que atuam na região, como frentes frias e ZCAS, afetam ambas as áreas, tornando os dados representativos para a análise regional.

### **3.3 Análise estatística e identificação de eventos extremos**

Inicialmente, foi realizada uma análise exploratória dos dados de precipitação e do nível da lagoa, com o objetivo de compreender a distribuição estatística das variáveis e identificar possíveis padrões sazonais. Para essa etapa, foram utilizados diferentes tipos de visualizações gráficas, como boxplots, histogramas e gráficos de linhas. Os boxplots permitiram avaliar a dispersão dos dados de precipitação, a presença de outliers, a mediana e a simetria das distribuições, oferecendo uma visão sintética das variações mensais e sazonais. Os histogramas foram utilizados para observar a frequência de ocorrência dos níveis elevados da lagoa. Já os gráficos de linhas possibilitaram o acompanhamento temporal das séries temporais das variáveis.

Após essa análise exploratória, foi adotado o método de bloco máximo, conforme proposto por Coles (2001), para identificar os eventos de precipitação extrema. Esse método consiste em dividir a série temporal em blocos (ou períodos) e, em seguida, selecionar o valor máximo (ou mínimo) observado em cada um deles. Neste estudo, os blocos considerados correspondem às quatro estações do ano, possibilitando a identificação dos eventos de precipitação extrema sazonais.

### 3.4 Relação entre as precipitações máximas e os níveis da Lagoa de Imboassica

Com o objetivo de investigar a influência das precipitações máximas sobre os níveis da Lagoa de Imboassica, foram aplicadas técnicas estatísticas de correlação simples, correlação cruzada e regressão linear simples. A análise de correlação cruzada, para o período de 2015 a 2023, permitiu avaliar o grau de associação entre as variáveis ao longo do tempo, considerando diferentes defasagens (lags) temporais. Essa abordagem é especialmente útil para identificar possíveis atrasos na resposta do nível da lagoa em relação aos eventos de chuvas intensas, revelando padrões de dependência temporal entre as séries. Segundo Vandaele (1983), o estimador da função correlação cruzada é dado pela Equação 1:

$$\hat{\rho}_{xy}(h) = \frac{\sum_{t=1}^{n-h} (x_{t+h} - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{n^{-1} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias das séries  $x_t$  e  $y_t$ ;  $h$  é o coeficiente de defasagem entre as séries; e  $n$  é o número de observações.

Na análise de correlação simples e cruzada, o coeficiente de correlação varia entre  $-1$  e  $+1$ , e seu valor indica o grau e a direção da associação linear entre duas séries temporais em diferentes defasagens (lags). Valores próximos de  $+1$  indicam forte correlação positiva, valores próximos de  $-1$  indicam forte correlação negativa e valores próximos de  $0$  sugerem ausência de correlação linear (Moore, 2007).

Também foi aplicado o modelo de regressão linear simples com o objetivo de quantificar a relação entre as precipitações máximas e os níveis da Lagoa de Imboassica. Esse modelo estabelece uma relação entre uma variável dependente e uma variável independente por meio de uma equação linear nos parâmetros (Montgomery; Peck; Vining, 2021). Neste estudo, a variável independente corresponde à série de dados das precipitações máximas, enquanto a variável dependente refere-se aos níveis da Lagoa de Imboassica. A qualidade do ajuste do modelo foi avaliada por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que expressa a proporção da variabilidade da variável dependente explicada pela variável independente.

### 3.5 Teoria dos Valores Extremos (TVE)

Como abordado no tópico 2.3, a TVE é uma ferramenta importante na modelagem e análise de eventos extremos, onde o período de retorno (ou intervalo médio de recorrência) corresponde à probabilidade  $p$  de um nível de retorno ter  $p100\%$  de chance de ser excedido em um determinado ano (Santos; Lucio; Silva, 2015).

A TVE se concentra no comportamento estocástico dos extremos de um conjunto de variáveis aleatórias com classes especiais de distribuições de probabilidade, a GEV e a GPD (Santos; Lucio; Silva, 2015). Neste estudo, será utilizada a distribuição GEV para estimar os níveis e períodos de retorno das precipitações máximas por estação do ano.

#### 3.5.1 Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV)

A distribuição GEV integra três tipos de distribuições (Gumbel, Fréchet e Weibull) em uma única estrutura, oferecendo uma abordagem unificada para a modelagem de eventos extremos (Fisher; Tippett, 1928). As expressões matemáticas que representam essas três formas podem ser descritas conforme Jenkinson (1995), e estão apresentadas nas Equações 2 e 3:

$$F(x) = \exp \left[ - \left( 1 - \xi \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^{\frac{1}{\xi}} \right], \text{ para } \xi \neq 0 \quad (2)$$

$$F(x) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right], \text{ para } \xi = 0 \quad (3)$$

Onde  $\mu$  é o parâmetro de posição com  $-\infty < \mu < \infty$ ;  $\sigma$  é o parâmetro de escala com  $0 < \sigma < \infty$  e  $\xi$  é o parâmetro de forma com  $-\infty < \xi < \infty$ . Será uma distribuição Gumbel quando  $\xi$  tender a zero, distribuição de Fréchet quando  $\xi > 0$  e distribuição de Weibull quando  $\xi < 0$ . Esses parâmetros foram estimados utilizando o método de máxima verossimilhança (Smith, 1985).

A probabilidade acumulada para o quantil  $x_p$  da distribuição GEV, com o período de retorno  $T$ , pode ser expressa por  $F(x_p) = 1 - (1/T)$ , conforme apresentado nas Equações 4 e 5 (Palutikof *et al.*, 1999):

$$x_p = \mu + \frac{\sigma}{\xi} \left\{ 1 - \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right]^\xi \right\}, \text{ para } \xi \neq 0 \quad (4)$$

$$x_p = \mu - \sigma \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right], \text{ para } \xi = 0 \quad (5)$$

No presente estudo, a distribuição GEV foi aplicada com base na segmentação da amostra em subperíodos sazonais, conforme a abordagem proposta por Coles (2001). Para cada estação do ano, foi selecionado o valor máximo, compondo assim o conjunto de precipitações máximas sazonais.

Para avaliar a qualidade do ajuste do modelo GEV, foi usado o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov. O teste compara a função de distribuição empírica dos dados com a distribuição teórica especificada, determinando se há uma diferença estatisticamente significativa entre elas (Leotti; Birck; Riboldi, 2005).

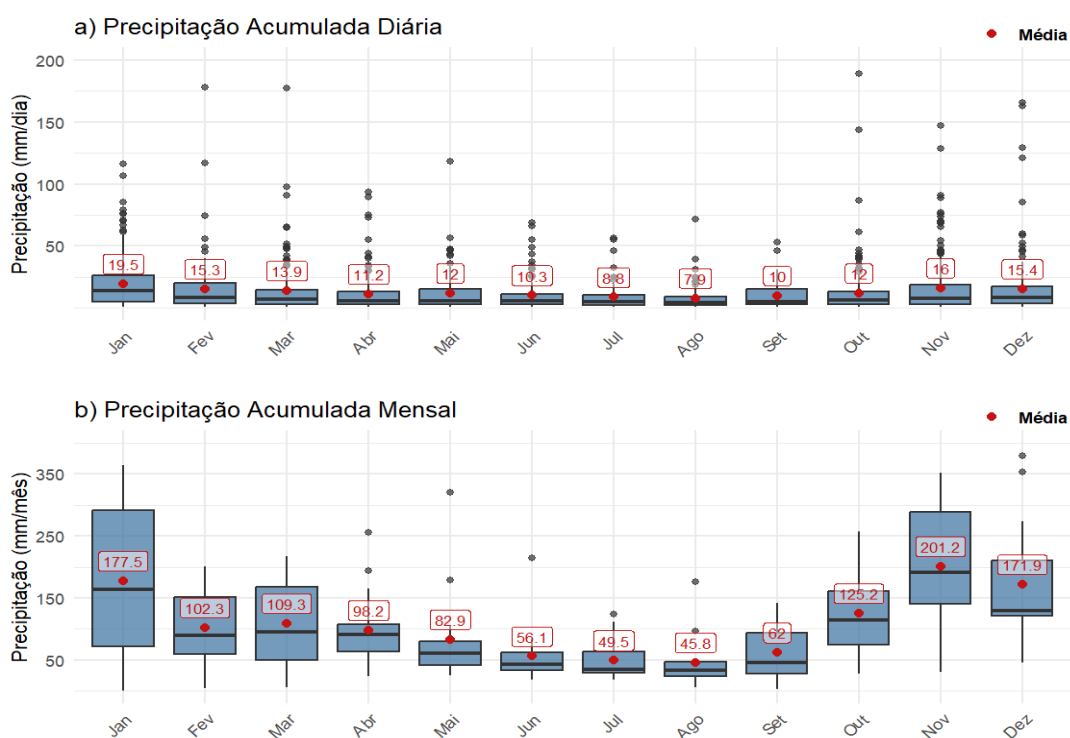
Todas as etapas de organização dos dados, realização das análises estatísticas e aplicação dos modelos foram conduzidas utilizando a linguagem de programação R (R CORE TEAM, 2025).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise exploratória da precipitação acumulada diária e mensal

A Figura 5 apresenta a precipitação acumulada diária em dias úmidos (precipitação > 1 mm) e a precipitação acumulada mensal para o período de 2007 a 2024. Observa-se que os maiores valores médios de precipitação diária ocorrem nos meses de verão, com destaque para janeiro (19,5 mm/dia), seguido por fevereiro (15,3 mm/dia) e dezembro (15,4 mm/dia). Esses meses também concentram os maiores totais mensais, com novembro apresentando o pico (201,2 mm/mês), seguido por janeiro (177,5 mm/mês) e dezembro (171,9 mm/mês), evidenciando a sazonalidade típica do regime pluviométrico da região, com maior concentração de chuvas nos meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro – DJF). Os valores pluviométricos são mais elevados nesses meses devido ao estabelecimento de sistemas atmosféricos típicos que avançam sobre a América do Sul, como a ZCAS (Reboita *et al.*, 2010).

**Figura 5.** Boxplot por mês da: a) Precipitação acumulada diária em dias úmidos (precipitação > 1) e b) Precipitação acumulada mensal, para o período de 2007 a 2024.

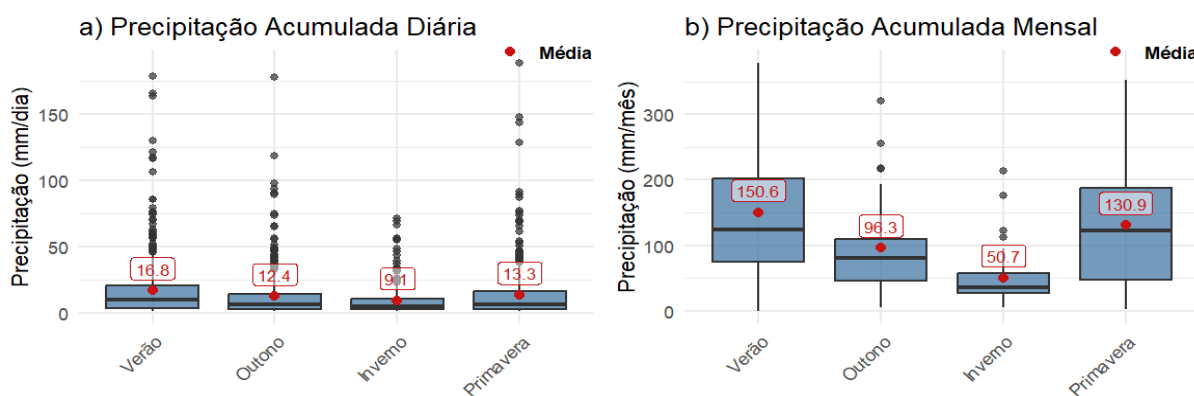


Fonte: Elaboração própria (2025).

Por outro lado, os meses de inverno, especialmente julho e agosto, registram os menores valores médios tanto na escala diária (8,8 mm/dia e 7,9 mm/dia, respectivamente) quanto na mensal (49,5 mm/mês e 45,8 mm/mês), reforçando o padrão climático regional, caracterizado por uma sazonalidade bem definida entre a estação seca e a estação chuvosa. Silva e Dereczynski (2014) afirmam que, nos meses de inverno, há uma significativa redução dos totais de precipitação no Estado do Rio de Janeiro, sendo a chuva consequência, em sua maioria, da atuação dos sistemas frontais.

A Figura 6, que apresenta a precipitação acumulada diária e mensal por estação do ano, confirma que o verão (DJF) é o período mais chuvoso da região. A média de precipitação acumulada diária nesse período é de 16,8 mm, enquanto a média mensal alcança 150,6. Em seguida, destaca-se a primavera (setembro, outubro e novembro - SON), com médias de 13,3 mm/dia e 130,9 mm/mês, evidenciando também uma contribuição relevante para o regime pluviométrico anual.

**Figura 6.** Boxplot por estação do ano da: a) Precipitação acumulada diária em dias úmidos (precipitação > 1) e b) Precipitação acumulada mensal, para o período de 2007 a 2024.



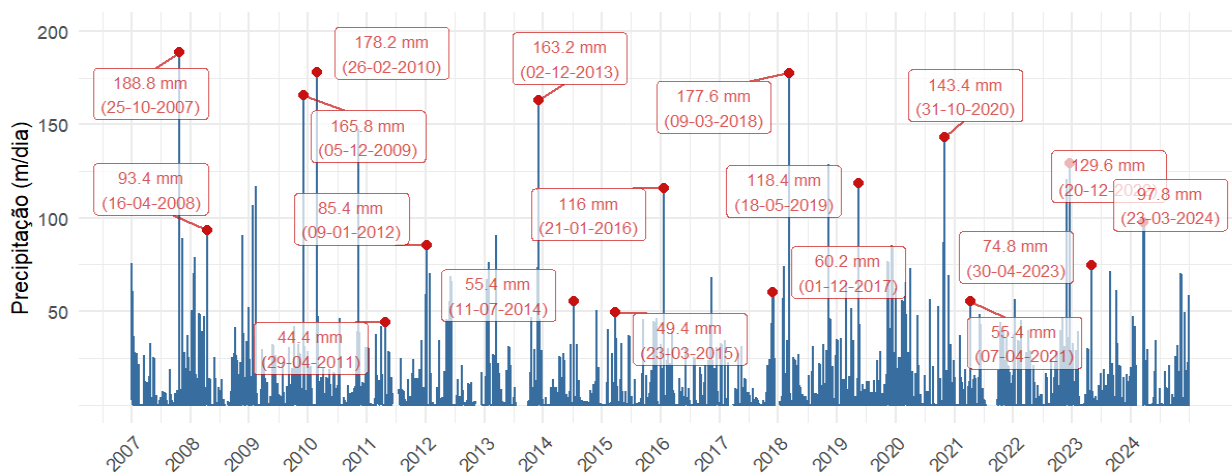
**Fonte:** Elaboração própria (2025).

Esses resultados são corroborados pelo estudo de Tavares e Santos (2022), que analisaram o comportamento das precipitações máximas no Estado do Rio de Janeiro. Esse estudo também identificou que os maiores volumes de chuva estão concentrados nos meses de verão, reforçando a predominância de precipitações extremas nesse período.

A Figura 7 apresenta a série temporal da precipitação acumulada diária para o período de 2007 a 2024. Os valores máximos anuais estão destacados em vermelhos, evidenciando eventos de chuva intensa ao longo do período. Observa-se uma

variabilidade entre os anos, com valores expressivos como os 188,8 mm/dia registrados em 25 de outubro de 2007 e os 178,2 mm/dia em 26 de fevereiro de 2010, indicando eventos de precipitação extrema.

**Figura 7.** Série temporal (2007 a 2024) da precipitação acumulada diária em dias úmidos (precipitação > 1) da estação meteorológica localizada em Macaé-RJ, com destaque para os valores máximos anuais.



**Fonte:** Elaboração própria (2025).

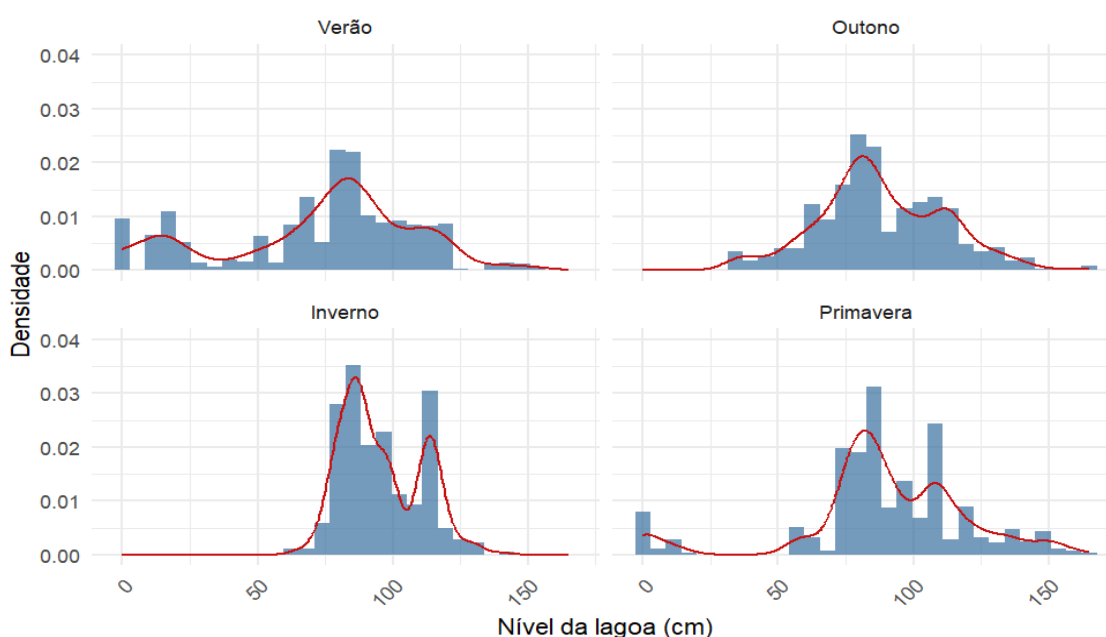
A distribuição dos máximos indica uma predominância de eventos intensos nos meses de verão (DJF) e outono (março, abril e maio – MAM). O outono (MAM) foi a estação com o maior número de máximos anuais de precipitação diária, com oito ocorrências, seguido pelo verão (DJF), com sete registros. Observa-se, no entanto, que os eventos registrados no verão (DJF) foram mais intensos. A primavera (SON) apresentou dois casos, enquanto o inverno (junho, julho e agosto – JJA) foi a estação com o menor número de máximos, com apenas uma ocorrência registrada.

O máximo anual registrado durante o inverno (55,6 mm/dia) ocorreu em 2014, ano que se destacou por intensos déficits pluviométricos no verão na região Sudeste do Brasil. A escassez de chuvas nesse período foi atribuída à atuação de um sistema de alta pressão atmosférica, consequência de um bloqueio atmosférico excepcionalmente intenso, persistente e anômalo, que impediu a passagem de frentes frias e restringiu o transporte de umidade proveniente da Amazônia em direção ao Brasil central, comprometendo a formação da ZCAS (Silva; Nascimento; Menezes, 2015; Coelho *et al.*, 2016; Nobre *et al.*, 2016).

## 4.2 Análise exploratória do nível da Lagoa de Imboassica

A Figura 8 apresenta a distribuição dos dados dos níveis da Lagoa de Imboassica por estação do ano, para o período de 2015 a 2023. Observa-se que, durante o verão e a primavera, estações do ano caracterizadas por maior intensidade de precipitação, conforme evidenciado na Figura 6, ocorrem registros de nível da lagoa igual a zero. Esses registros provavelmente estão associados à abertura artificial da barra da lagoa, prática recorrente especialmente durante períodos chuvosos, como apontado por Erazo (2003). Entre 2015 e 2023, foram registradas cerca de 27 aberturas do canal extravasor e 3 aberturas da barra/lagoa.

**Figura 8.** Distribuição dos dados do nível da lagoa de Imboassica com linha de densidade (em vermelho), por estação do ano, para o período de 2015 a 2023.



**Fonte:** Elaboração própria (2025).

O estudo de Souza *et al.* (2019) destaca que a abertura da barra é uma ação de manejo adotada com frequência, especialmente em períodos de chuvas intensas. Essa intervenção compromete a representatividade dos dados hidrológicos, dificultando a análise precisa do comportamento natural do sistema. Além disso, Santos e Ferreira (2014) apontam que essas aberturas são necessárias devido à intensa urbanização da bacia hidrográfica da lagoa, mas que impactam diretamente a qualidade e a consistência dos dados ambientais coletados.

A abertura da barra tem como objetivo evitar o alagamento das residências construídas nas margens da lagoa ou quando a qualidade da água apresenta péssimas condições para lazer e pesca, principais usos da lagoa (Erazo, 2003). No entanto, essa intervenção pode provocar uma rápida redução do nível da água, resultando em valores mínimos ou até mesmo em secas temporárias. A distribuição dos dados apresentados na Figura 8 reforça essa dinâmica: no verão, há maior concentração de níveis em torno de 50 cm e 100 cm, mas também aparecem registros de nível zero, indicando eventos de esvaziamento abrupto. Na primavera, embora o pico de densidade ocorra em torno de 100 cm, há também registros em 150 cm, 50 cm e zero, evidenciando grande variabilidade.

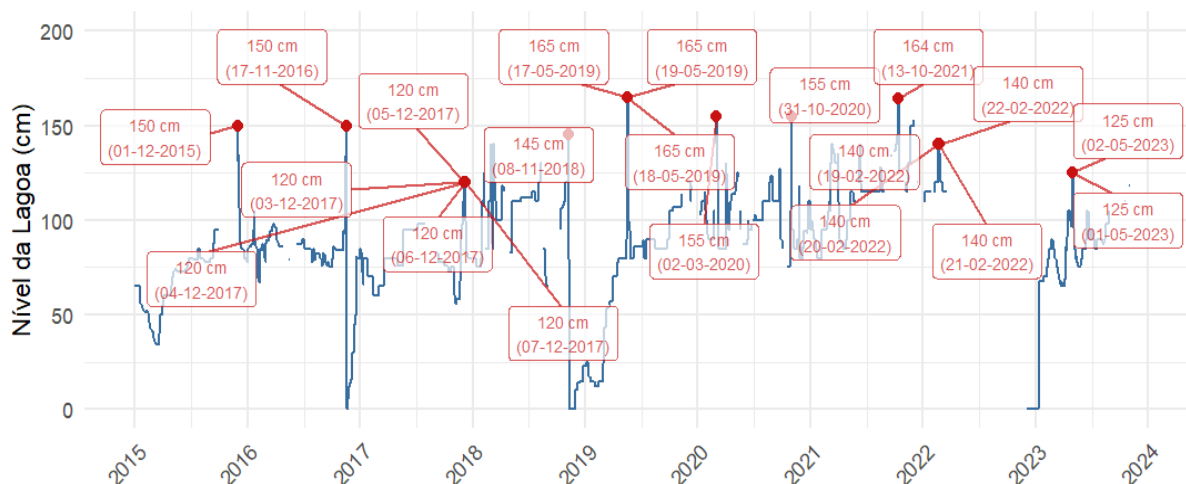
No outono, os níveis da Lagoa de Imboassica apresentam uma distribuição mais uniforme, com concentração em torno de 80 cm. Esse padrão indica uma relativa estabilidade hídrica durante esse período, possivelmente associada à menor intensidade das chuvas em comparação ao verão e primavera. A ausência de registros de nível zero tanto no outono quanto no inverno sugere que a abertura da barra da lagoa não é frequente nessas estações, o que contribui para a manutenção de níveis mais elevados e contínuos.

Os padrões sazonais apresentados na Figura 8 evidenciam a complexa interação entre fatores climáticos e intervenções antrópicas na regulação dos níveis da Lagoa de Imboassica. Além da abertura artificial da barra da lagoa, destaca-se também a presença do canal extravasor localizado próximo à Praia das Pedrinhas, na divisa com o município de Rio das Ostras. Essa estrutura foi implementada na década de 1980 com o objetivo de controlar o nível da água, mantendo o volume hídrico dentro de limites considerados ideais e evitando o transbordamento excessivo da lagoa, que frequentemente resultava na necessidade de abertura artificial da barra (Santos; Ferreira, 2014).

A Figura 9 apresenta a série temporal do nível da Lagoa de Imboassica entre os anos de 2015 e 2023, com destaque para os valores máximos anuais. Destacam-se os picos registrados em maio de 2019, quando o nível da lagoa atingiu 165 cm por três dias consecutivos (17, 18 e 19 de maio), configurando o maior valor da série e evidenciando um episódio de cheia de grande magnitude. É importante ressaltar que, no dia 17 de maio de 2019, ocorreu a abertura do canal extravasor, conforme dados disponibilizados pela SEMAS. Esse aumento no nível da lagoa está associado à ocorrência de chuvas intensas, conforme evidenciado na Figura 7, que apresenta a

precipitação máxima anual registrada em 2019 no dia 18 de maio de 118,4 mm. A relação entre os dados de precipitação e os níveis da lagoa reforça a sensibilidade do sistema lagunar às variações pluviométricas, especialmente durante eventos extremos.

**Figura 9.** Série temporal (2015 a 2023) do nível da Lagoa de Imboassica, com destaque para os valores máximos anuais.



**Fonte:** Elaboração própria (2025).

Além dos eventos de 2019, outros picos relevantes foram observados em dezembro de 2015 e novembro de 2016, ambos com 150 cm, bem como em março e outubro de 2020, com 155 cm, e em outubro de 2021, com 164 cm. Esses episódios indicam uma tendência de elevação do nível da lagoa durante os meses mais chuvosos, especialmente entre o final da primavera e o início do verão, período caracterizado por maior ocorrência de precipitações intensas na região. Em resposta a esses eventos, em alguns casos, houve a abertura do canal extravasor, como em 1º de dezembro de 2015, 31 de outubro de 2020 e 12 de outubro de 2021.

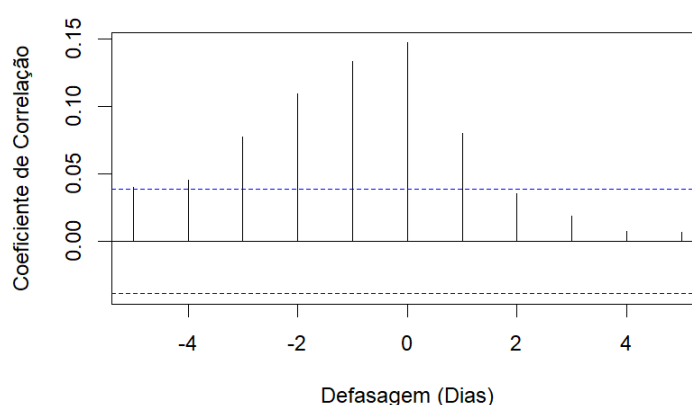
Esses episódios evidenciam a sensibilidade da lagoa às chuvas intensas, que promovem elevações rápidas no nível da água (Santos; Ferreira, 2014). Alguns eventos são decorrentes de precipitações que ocorreram em dias anteriores. A recorrência desses episódios ao longo dos anos evidencia a necessidade de um sistema de monitoramento hidrometeorológico contínuo, aliado a ações preventivas integradas, como a operação estratégica do canal extravasor e o planejamento urbano adaptado às condições climáticas.

### 4.3 Relação entre o nível da Lagoa de Imboassica e a precipitação acumulada diária

A Figura 10 apresenta a análise de correlação cruzada entre o nível da Lagoa de Imboassica e a precipitação, abrangendo o período de 2015 a 2023. Para diminuir o comprometimento dos resultados devido à interferência humana, foram excluídos da análise os intervalos em que o nível da lagoa foi registrado como zero. Os coeficientes de correlação são representados por barras verticais, enquanto as linhas tracejadas horizontais indicam os limites de significância estatística ao nível de 5%. Verifica-se a ocorrência de correlações estatisticamente significativas tanto na correlação simultânea (defasagem zero) quanto em defasagens de até quatro dias, sendo a associação mais intensa registrada na correlação simultânea. Esse resultado sugere que o nível da Lagoa de Imboassica responde de forma rápida às ocorrências de precipitação.

A defasagem de até quatro dias observada na correlação entre precipitação e nível da lagoa pode estar relacionada à dinâmica do armazenamento subterrâneo. Após os eventos de chuva, parte da água infiltra-se no solo e escoar lentamente por meio de fluxos subsuperficiais (Monteiro, 2024), alcançando a lagoa com atraso.

**Figura 10.** Correlação cruzada entre a precipitação e o nível da Lagoa de Imboassica, para o período de 2015 a 2023.



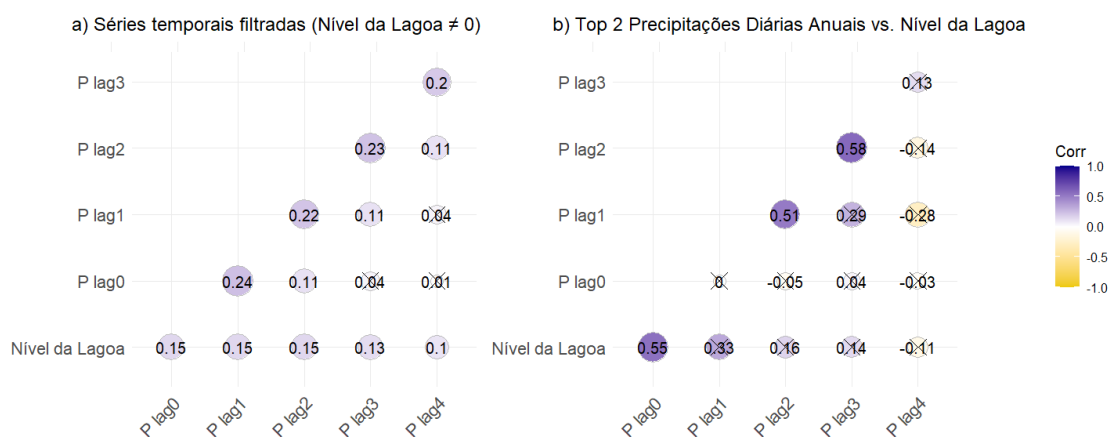
**Fonte:** Elaboração própria (2025).

Segundo Santos e Ferreira (2014), essa rápida resposta do nível da Lagoa de Imboassica às precipitações pode ser atribuída ao intenso grau de urbanização da bacia da Lagoa de Imboassica, a impermeabilização do solo e a existência de canais

de drenagem artificiais que aceleram o escoamento superficial, promovendo aumento rápido do nível d'água.

A Figura 11 apresenta matrizes contendo os coeficientes de correlação de Pearson entre o nível da lagoa e a precipitação diária, considerando diferentes defasagens temporais (lags). Os valores que não atingem significância estatística ao nível de 5% estão indicados com um "x". A escala de cores varia de -1 (correlação negativa forte) a +1 (correlação positiva forte). Na Figura 11a, observa-se a correlação entre a série temporal filtrada (nível da lagoa  $\neq$  0) e a precipitação diária, revelando que todas as defasagens analisadas apresentaram correlação significativa com o nível da lagoa. Já na Figura 11b, que considera exclusivamente os dois eventos de máximos anuais de precipitação diária, a correlação com o nível da lagoa foi significativa apenas no lag 0, indicando uma resposta imediata da lagoa à ocorrência desses eventos extremos. Esses resultados reforçam a complexidade da dinâmica lagunar, influenciada não apenas pela precipitação, mas também por fatores como a urbanização da bacia, a impermeabilização do solo e as intervenções antrópicas, como a abertura da barra e do canal extravasor.

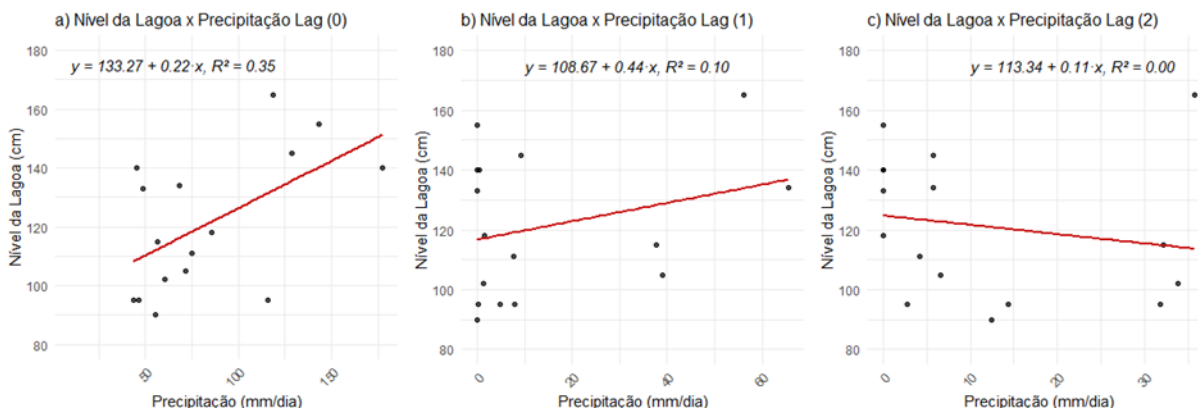
**Figura 11.** Matriz de correlação entre o nível da lagoa e a precipitação diária: a) Séries temporais filtradas (nível da lagoa  $\neq$  0) e b) Top 2 precipitações diárias anuais vs. nível da lagoa.



**Fonte:** Elaboração própria (2025).

A Figura 12 apresenta gráficos de dispersão que exploram a relação entre o nível da Lagoa de Imboassica e os dois maiores eventos anuais de precipitação diária, considerando defasagens de 0, 1 e 2 dias (lags). Os gráficos de dispersão são acompanhados por linhas de regressão linear, cujas equações e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) indicam o grau de associação entre as variáveis.

**Figura 12.** Relação entre o nível da Lagoa de Imboassica e os dois eventos de máximos anuais de precipitação diária, nos lags de 0, 1 e 2 dias.



**Fonte:** Elaboração própria (2025).

Observa-se que a correlação mais significativa ocorreu entre o nível da Lagoa de Imboassica e a precipitação do próprio dia (lag 0), com um coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,35$ . Esse resultado indica que a lagoa responde de forma mais imediata às chuvas ocorridas no mesmo dia, evidenciando uma dinâmica hidrológica sensível a eventos extremos. Essa resposta rápida pode ser atribuída às dimensões reduzidas da bacia hidrográfica da Lagoa de Imboassica, que possui aproximadamente 5,3 km de comprimento e 1,3 km de largura (Branco *et al.*, 2007), resultando em baixo tempo de concentração e justificando a correlação observada para a defasagem zero. Tal comportamento reforça a necessidade de monitoramento em tempo real e de ações rápidas de gestão, especialmente durante episódios de precipitação intensa.

Verifica-se que, nas defasagens de um e dois dias, há uma redução expressiva na magnitude da correlação. No entanto, é importante destacar que os registros de precipitação utilizados neste estudo foram obtidos em uma estação meteorológica que não está localizada nas proximidades imediatas da lagoa, o que pode introduzir discrepâncias entre os volumes efetivamente precipitados.

A Tabela 1 apresenta os registros do nível da Lagoa de Imboassica correspondentes aos dois eventos de máximos anuais de precipitação diária, incluindo até dois dias subsequentes a cada evento. Entre 2015 e 2023, diversos episódios de precipitação extrema levaram à abertura do canal extravasor da Lagoa de Imboassica, como medida de controle do nível da água. Em 9 de março de 2018, por exemplo, o

canal extravasor foi aberto após o transbordamento da lagoa no dia anterior, que resultou na invasão da Avenida Amphilóphio Trindade, no bairro Praia do Pecado, em Macaé – RJ. Em 17 de maio de 2019, um dia antes do máximo de precipitação anual, o canal foi aberto, com o nível da lagoa atingindo 165,0 cm. No ano de 2023, a abertura foi realizada dois dias após a ocorrência da precipitação máxima do ano.

**Tabela 1.** Registros do nível da lagoa associados aos dois eventos de máximos anuais de precipitação diária, considerando até dois dias após o evento.

Data	Precipitação	Nível Lagoa no dia	Nível Lagoa 1 dia depois	Nível Lagoa 2 dias depois	Abertura do canal ou da barra
23/03/2015	49,4 mm	48,0 cm	50,0 cm	50,0 cm	Não.
07/12/2015	46,6 mm	95,0 cm	95,0 cm	88,0 cm	Não.
21/01/2016	116,0 mm	95,0 cm	105,0 cm	90,0 cm	Não.
15/11/2016	68,2 mm	134,0 cm	140,0 cm	150,0 cm	Não.
01/12/2017	60,2 mm	102,0 cm	110,0 cm	120,0 cm	Abertura do canal extravasor.
23/11/2017	43,4 mm	95,0 cm	95,0 cm	95,0 cm	Não.
09/03/2018	177,6 mm	140,0 cm	140,0 cm	130,0 cm	Abertura do canal extravasor.
08/11/2018	129 mm	145,0 cm	80,0 cm	0 cm	Abertura do canal extravasor.
18/05/2019	118,4 mm	165,0 cm	165,0 cm	145,0 cm	Não.
11/12/2019	85,4 mm	118,0 cm	118,0 cm	116,0 cm	Não.
31/10/2020	143,4 mm	155,0 cm	95,0 cm	95,0 cm	Abertura do canal extravasor.
25/10/2020	87 mm	75,0 cm	105,0 cm	105,0 cm	Não.
07/04/2021	55,4 mm	90,0 cm	90,0 cm	88,0 cm	Não.
09/06/2021	48,6 mm	133,0 cm	140,0 cm	140,0 cm	Não.
20/12/2022	129,6 mm	0 cm	0 cm	0 cm	A barra já se encontrava aberta.
09/01/2022	56,6 mm	115,0 cm	115,0 cm	115,0 cm	Abertura do canal extravasor.
30/04/2023	74,8 mm	111,0 cm	125,0 cm	125,0 cm	Não.
28/08/2023	71,4 mm	105,0 cm	Régua não verificada.	Régua não verificada.	Abertura do canal extravasor.

**Fonte:** Elaboração própria (2025).

O episódio de 2022 se destaca, em que, apesar da ocorrência de 129,6 mm de precipitação no dia 20 de dezembro de 2022, o nível da lagoa foi registrado como zero tanto no dia do evento quanto nos dois dias seguintes. Esse comportamento se deve à abertura do canal extravasor no dia 30 de novembro de 2022 e a abertura artificial da barra da Lagoa de Imboassica, realizada em 1º de dezembro de 2022. Após essa intervenção, o nível da água permaneceu em zero até o dia 11 de janeiro de 2023.

Essas práticas de abertura do canal extravasor e da barra da lagoa são recorrentes e documentadas na literatura científica. De acordo com os estudos de Santangelo *et al.* (2007) e Farias *et al.* (2019), essa intervenção modifica de forma significativa a dinâmica hidrológica da lagoa, afetando diretamente os níveis de água e a composição das comunidades biológicas.

Esses resultados corroboram a análise de correlação cruzada (Figura 10), evidenciando que os maiores níveis da lagoa estão frequentemente associados a eventos pluviométricos ocorridos até dois dias antes, tal comportamento é compatível com a dinâmica hidrológica de sistemas urbanos, nos quais o escoamento superficial é acelerado, mas ainda sujeito a processos de acumulação e propagação que influenciam o tempo de resposta do corpo hídrico (Nunes; Borba, 2018).

A Tabela 2 apresenta os registros de precipitação associados aos dias de ocorrência de dois máximos anuais do nível da Lagoa de Imboassica, considerando defasagens de 0 (lag 0), 1 (lag 1) e 2 (lag 2), com o intuito de identificar possíveis relações temporais entre os eventos de chuva e os picos de nível da lagoa.

**Tabela 2.** Registros de precipitação associados aos dois eventos de máximos anuais do nível da lagoa, considerando defasagens de 0 a 4 dias.

Data	Nível Lagoa	Precipitação (lag 0)	Precipitação (lag 1)	Precipitação (lag 2)	Abertura do canal ou da barra
01/12/2015	150 cm	41,6 mm	30,2 mm	0,0 mm	Abertura do canal extravasor.
02/12/2015	135 cm	0,4 mm	41,6 mm	30,2 mm	Não.
17/11/2016	150 cm	23,6 mm	10,8 mm	68,2 mm	A barra já se encontrava aberta.
16/11/2016	140 cm	10,8 mm	68,2 mm	65,6 mm	Abertura da barra da lagoa.
03/12/2017	120 cm	0,2 mm	3,8 mm	60,2 mm	O canal já se encontrava aberto.
04/12/2017	120 cm	0 mm	0,2 mm	3,8 mm	O canal já se encontrava aberto.
08/11/2018	145 cm	129 mm	9,2 mm	5,8 mm	Abertura do canal extravasor.
27/02/2018	140 cm	13,6 mm	0 mm	0 mm	Não.
17/05/2019	165 cm	56,2 mm	35,8 mm	47,2 mm	Abertura do canal extravasor.
18/05/2019	165 cm	118 mm	56,2 mm	35,8 mm	Não.
02/03/2020	155 cm	65,4 mm	14,4 mm	7,0 mm	Não.
31/10/2020	155 cm	143 mm	0,0 mm	0,0 mm	Abertura do canal extravasor.
13/10/2021	164 cm	9,2 mm	16,2 mm	44,0 mm	Não.
12/10/2021	160 cm	16,2 mm	44 mm	6,4 mm	Abertura do canal extravasor.
19/02/2022	140 cm	45,2 mm	0,4 mm	0,0 mm	Não.
20/02/2022	140 cm	22,4 mm	45,2 mm	0,4 mm	Não.
01/05/2023	125 cm	0,2 mm	74,8 mm	7,6 mm	Não.
02/05/2023	125 cm	0 mm	0,2 mm	74,8 mm	Abertura do canal extravasor.

**Fonte:** Elaboração própria (2025).

Os dados apresentados na Tabela 2 evidenciam que, em diversos eventos, os picos de nível da lagoa não coincidem necessariamente com precipitações intensas no mesmo dia (lag 0), mas sim com acumulados nos dias anteriores, reforçando a hipótese de resposta com defasagem temporal do sistema lagunar às chuvas. Por exemplo, em 17/11/2016, o nível máximo de 150 cm foi precedido por elevado volume de precipitação (68,2 mm) dois dias antes (lag 2), enquanto o valor registrado no próprio dia foi de apenas 23,6 mm.

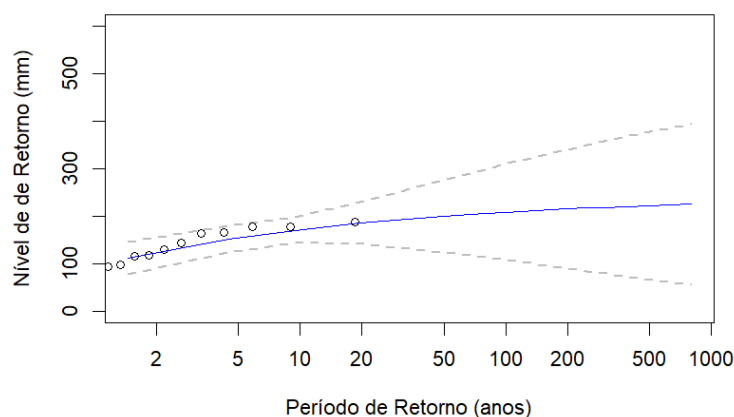
Também foi possível observar casos em que a precipitação intensa ocorre simultaneamente ao pico do nível da lagoa, como em 08/11/2018, quando foram registrados 129 mm de chuva no mesmo dia em que o nível atingiu 145 cm. Esse episódio indica uma resposta imediata do sistema lagunar à precipitação,

evidenciando que, em determinadas situações, o aumento do nível da água pode ocorrer de forma praticamente instantânea, especialmente diante de chuvas intensas e concentradas.

#### 4.4 Modelagem das precipitações máximas usando a distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV)

A Figura 13 apresenta as estimativas dos períodos de retorno para precipitações máximas diárias anuais, obtidas por meio da aplicação da distribuição GEV. Esses períodos indicam a frequência esperada de eventos de determinada intensidade, permitindo compreender a relação entre a magnitude das precipitações e a probabilidade de sua ocorrência ao longo do tempo. Para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, as estimativas indicam que a precipitação máxima diária anual esperada em Macaé-RJ é, respectivamente: 111,1 mm, 151,0 mm, 170,5 mm, 189,3 mm, 200,0 mm e 208,5 mm.

**Figura 13.** Estimativas dos níveis de retorno para precipitações máximas. A linha azul central representa a média estimada para cada período de retorno, enquanto as linhas cinzas indicam os intervalos de confiança de 95%. Os círculos abertos correspondem aos valores observados.



**Fonte:** Elaboração própria (2025).

Além das estimativas pontuais dos períodos de retorno, é essencial levar em conta a incerteza associada a essas estimativas. O intervalo de confiança delimita uma faixa de valores onde se espera que a estimativa real do período de retorno esteja compreendida. Com um nível de confiança de 95% (representada pelas linhas tracejadas), a Figura 7 evidencia que a largura desse intervalo se expande à medida que a intensidade dos eventos aumenta e os períodos de retorno se tornam mais

longos. Esse comportamento reflete a menor precisão das estimativas para eventos raros e extremos, devido à limitação de dados disponíveis para essas ocorrências.

A Tabela 3 apresenta os registros de eventos de precipitação cuja intensidade igualou ou superou os limiares estimados para os períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos. No período analisado (2007 a 2024), foram identificados, respectivamente, 13, 5 e 3 eventos que atingiram ou superaram os valores associados a esses períodos de retorno.

**Tabela 3.** Registros dos eventos de precipitações cuja intensidade igualou ou superou os limiares estimados para os períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos.

Período de Retorno	Limiares Estimados	Eventos
2 anos	111,1 mm/dia	25/10/2007 (188,8 mm/dia) 13/02/2009 (117,0 mm/dia) 05/12/2009 (165,8 mm/dia) 26/02/2010 (178,2 mm/dia) 11/11/2010 (147,4 mm/dia) 02/12/2013 (163,2 mm/dia) 21/01/2016 (116,0 mm/dia) 09/03/2018 (177,6 mm/dia) 08/11/2018 (128,8 mm/dia) 18/05/2019 (118,4 mm/dia) 31/10/2020 (143,4 mm/dia) 01/12/2022 (121,0 mm/dia) 20/12/2022 (129,6 mm/dia)
5 anos	151,0 mm/dia	25/10/2007 (188,8 mm/dia) 05/12/2009 (165,8 mm/dia) 26/02/2010 (178,2 mm/dia) 02/12/2013 (163,2 mm/dia) 09/03/2018 (177,6 mm/dia)
10 anos	170,5 mm/dia	25/10/2007 (188,8 mm/dia) 26/02/2010 (178,2 mm/dia) 09/03/2018 (177,6 mm/dia)

**Fonte:** Elaboração própria (2025).

Entre os eventos registrados no período de 2015 a 2023, conforme dados disponibilizados pelo SEMAES, destacam-se as aberturas do canal extravasor ocorridas nas seguintes datas: 09/03/2018 (177,6 mm/dia), 08/11/2018 (128,8 mm/dia) e 31/10/2020 (143,4 mm/dia). Adicionalmente, em 01/12/2022, foi registrada a abertura da lagoa, associada a uma precipitação de 121,0 mm/dia. Esses registros evidenciam como as precipitações intensas influenciam diretamente no nível da lagoa.

Esses resultados apontam uma predominância de eventos extremos com baixa recorrência (2 anos), onde o limiar de 111,1 mm/dia foi superado em 13 vezes, com destaque para os eventos de 25/10/2007 (188,8 mm/dia), 26/02/2010 (178,2 mm/dia) e 09/03/2018 (177,6 mm/dia), que também ultrapassaram os limiares dos períodos de

retorno de 5 e 10 anos. Esses três episódios evidenciam a ocorrência de precipitações intensas, capazes de provocar impactos significativos em áreas urbanas vulneráveis.

A ocorrência de 5 eventos que excederam o limiar de 151,0 mm/dia (5 anos) e 3 que ultrapassaram 170,5 mm/dia (10 anos) em um intervalo de tempo de apenas 18 anos (2007 a 2024) sugere uma maior frequência dos extremos hidrológicos. Esses resultados evidenciam a necessidade de revisão dos parâmetros utilizados em projetos de drenagem urbana, que muitas vezes se baseiam em séries históricas que não refletem a atual dinâmica climática.

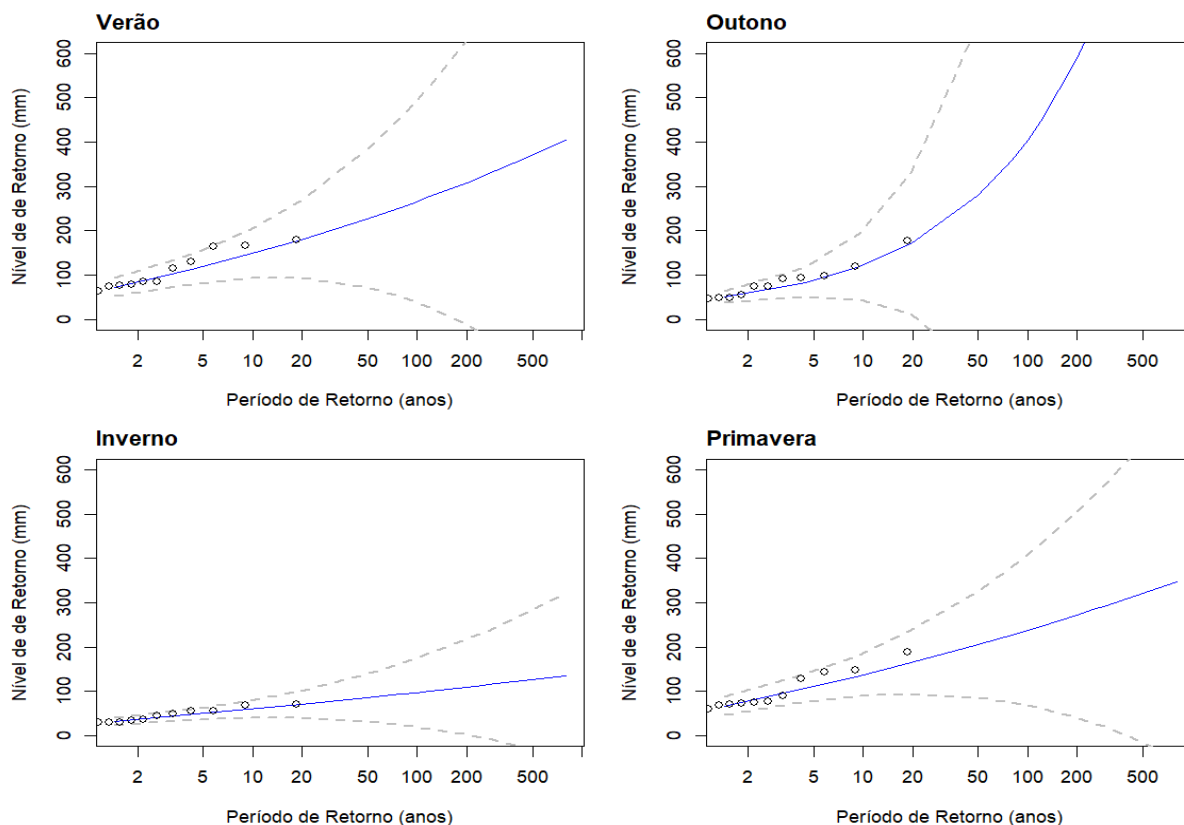
Na Tabela 4 e Figura 14, observam-se os níveis e os períodos de retorno para as quatro estações do ano. No verão, observam-se as maiores estimativas para os períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos, com valores de 73,0 mm (2 anos) a 146,6 mm (10 anos). Esse padrão é atribuído à predominância de chuvas convectivas, intensas e frequentes, típicas da estação na região, conforme descrito por Reboita *et al.* (2010). Já para os períodos de retorno mais longos, como 50 e 100 anos, os maiores valores foram estimados para o outono. No entanto, essas estimativas apresentam elevada incerteza, evidenciada pelos amplos intervalos de confiança de 95%, representados pelas linhas tracejadas nos gráficos.

**Tabela 4.** Estimativas dos níveis de precipitação máxima diária para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

Período de Retorno	Níveis de Retorno			
	Verão (DJF)	Outono (MAM)	Inverno (JJA)	Primavera (SON)
2 anos	73,0 mm	50,3 mm	32,5 mm	67,4 mm
5 anos	115,2 mm	83,1 mm	48,6 mm	107,6 mm
10 anos	146,6 mm	119,4 mm	59,8 mm	136,3 mm
25 anos	190,6 mm	193,0 mm	74,6 mm	175,3 mm
50 anos	226,7 mm	278,8 mm	86,0 mm	206,2 mm
100 anos	265,9 mm	404,5 mm	97,8 mm	238,8 mm

**Fonte:** Elaboração própria (2025).

**Figura 14.** Estimativas de períodos de retorno para precipitações máximas (níveis de retorno), para as quatro estações do ano: Verão (DJF), Outono (MAM), Inverno (JJA) e Primavera (SON). As linhas azuis centrais representam as médias estimadas para cada período de retorno, enquanto as linhas cinzas indicam os intervalos de confiança de 95%. Os círculos abertos correspondem aos valores observados.



**Fonte:** Elaboração própria (2025).

A primavera também apresenta níveis elevados, com estimativas entre 67,4 (2 anos) mm e 238,8 mm (100 anos), refletindo a retomada das chuvas após o inverno seco, como apontado por Alves, Marengo e Castro (2002). Já o inverno apresentou os menores níveis de retorno, com totais entre 32,46 mm (2 anos) e 97,80 mm (100 anos). Essa baixa ocorrência de eventos extremos está associada ao clima seco predominante na região, conforme apresentado na Figura 5.

O teste de Kolmogorov-Smirnov confirmou, ao nível de significância de 5%, a adequação da distribuição GEV para estimar a ocorrência das precipitações máximas diárias. Esse resultado está apresentado na Tabela 5. O p-valor obtido nas análises anual e sazonal foi superior a 0,05, indicando que não há evidências estatísticas para rejeitar a hipótese de que os dados seguem a distribuição GEV. Isso indica que a diferença entre a distribuição empírica e a teórica não é significativa, validando o uso da GEV como modelo representativo para os eventos extremos analisados.

**Tabela 5.** Resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov aplicado às distribuições GEV nas análises anual e sazonal.

<b>Período</b>	<b>Estatística D</b>	<b>P-valor</b>
Anual	0,14481	0,8447
Verão (DJF)	0,10855	0,9838
Outono (MAM)	0,13466	0,8577
Inverno (JJA)	0,1051	0,9762
Primavera (SON)	0,13154	0,8753

**Fonte:** Elaboração própria (2025).

## 5. PRODUTO TECNOLÓGICO

Como resultado da pesquisa desenvolvida, foi elaborado o Tutorial GEV em linguagem R, disponível publicamente no repositório do GitHub do grupo de Pesquisa e Extensão Universitária em Ciências Climáticas e Ambientais (PEXCCA/UENF), <https://github.com/PEXCCA-UENF/Tutoriais-R>, sob a licença MIT. Trata-se de um roteiro técnico-didático voltado à aplicação da distribuição de valores extremos generalizada (GEV) para análise de precipitações máximas, com foco em estimativas de períodos de retorno, uma ferramenta essencial para estudos hidrológicos, planejamento urbano e gestão de riscos climáticos.

O tutorial contempla desde a preparação dos dados até a implementação do modelo GEV, com explicações passo a passo, comandos comentados e exemplos práticos. Sua finalidade é capacitar profissionais, pesquisadores e estudantes na utilização de métodos estatísticos robustos para avaliação de eventos extremos, promovendo a reprodutibilidade científica e o aprimoramento de diagnósticos ambientais.

A relevância do produto se evidencia na sua aplicabilidade direta em contextos de gestão de recursos hídricos, infraestrutura urbana, planejamento territorial e monitoramento climático, especialmente em regiões vulneráveis à variabilidade pluviométrica. Além disso, o tutorial contribui para a formação técnica de equipes multidisciplinares, podendo ser incorporado em cursos de graduação, pós-graduação, capacitações institucionais e projetos de extensão.

Por sua natureza aberta e adaptável, o produto possui alto potencial de implementação em instituições públicas, centros de pesquisa, universidades e órgãos de defesa civil, funcionando como um instrumento de apoio à tomada de decisão e à formulação de políticas públicas voltadas à resiliência climática.

## 6. CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo principal analisar a relação entre os eventos de precipitação máxima e os níveis da Lagoa de Imboassica, situada em Macaé-RJ, além de estimar os períodos de retorno e os valores associados às precipitações extremas por meio de modelagem estatística, utilizando a Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV). A abordagem adotada permitiu caracterizar a variabilidade pluviométrica local e contribuiu para a compreensão da resposta hidrológica do sistema lagunar frente a eventos extremos, em um contexto de crescente vulnerabilidade climática e urbanização acelerada.

A análise exploratória dos dados de precipitação evidenciou uma sazonalidade bem definida, com predominância de chuvas nos meses de verão (DJF), corroborando a atuação de sistemas meteorológicos como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A análise da precipitação acumulada diária e mensal por estação do ano confirma que o verão (DJF) é o período mais chuvoso da região, seguido pela primavera (SON). Os eventos extremos mais intensos ocorreram majoritariamente no verão e outono. A distribuição dos máximos por estação reforça a importância da análise sazonal na identificação de padrões críticos de precipitação.

A Lagoa de Imboassica apresentou sensibilidade às chuvas intensas, com variações de nível, especialmente durante o verão e primavera. A ocorrência de níveis igual a zero, mesmo em dias de precipitação extrema, foi atribuída à abertura artificial da barra arenosa e a abertura do canal extravasor, prática recorrente para evitar alagamentos e preservar os usos recreativos da lagoa.

A análise estatística indicou resposta rápida do nível da lagoa à precipitação, com correlações significativas em defasagens de até quatro dias, sendo o lag 0 (correlação simultânea) o mais expressivo. A regressão linear, aplicada aos dois maiores eventos anuais de precipitação, reforçou essa dinâmica, indicando maior influência da chuva no mesmo dia ( $R^2 = 0,35$ ), com redução nos dias seguintes.

A aplicação da distribuição GEV permitiu estimar os níveis e períodos de retorno das precipitações máximas, tanto na escala anual quanto sazonal. As maiores estimativas para os períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos foram observados no verão, com valores de 73,0 mm (2 anos) a 146,6 mm (10 anos). O teste de Kolmogorov-Smirnov confirmou, ao nível de 5% de significância, a adequação da distribuição GEV para estimar as precipitações máximas diárias, validando seu uso como modelo

representativo para os eventos extremos nas escalas anual e sazonal. A análise sazonal indicou maior risco hidrológico no verão e na primavera, enquanto o inverno apresentou os menores níveis de retorno.

Os resultados deste estudo evidenciam a complexa interação entre fatores climáticos e intervenções humanas na dinâmica da Lagoa de Imboassica. A recorrência de precipitações extremas, a necessidade de abertura da barra e do canal extravasor, e a variabilidade dos níveis da lagoa reforçam a importância de um sistema de monitoramento hidrometeorológico contínuo, bem como de estratégias de manejo adaptativas e sustentáveis. Esses resultados também oferecem subsídios técnicos relevantes para a gestão integrada dos recursos hídricos, o ordenamento territorial e a formulação de políticas públicas voltadas à resiliência climática, fortalecendo a capacidade adaptativa da região frente às mudanças climáticas. No contexto das políticas públicas em Macaé (RJ), os dados obtidos podem contribuir para o aperfeiçoamento de instrumentos de planejamento e gestão ambiental.

Como perspectivas para estudos futuros, destacam-se duas abordagens complementares que podem aprofundar a compreensão da dinâmica da Lagoa de Imboassica. A primeira consiste no desenvolvimento de modelos preditivos capazes de simular a resposta do nível da lagoa frente a diferentes cenários de precipitação, contribuindo para a antecipação de situações de risco, como elevações abruptas do nível da água. A segunda envolve a incorporação de variáveis relacionadas à qualidade da água, como concentração de nutrientes, oxigênio dissolvido e presença de contaminantes. Integrar essas informações à análise de precipitação e nível da lagoa pode oferecer uma visão mais completa dos impactos ambientais e contribuir para estratégias de manejo mais sustentáveis.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L.M.; MARENGO, J.A.; CASTRO, C.A.C. Início das chuvas na região Sudeste do Brasil: análise climatológica. In: **Congresso Brasileiro De Meteorologia**. 2002. p. 1403-1410. Disponível em: [http://mtc-m16b.sid.inpe.br/attachment.cgi/sid.inpe.br/iris@1915/2005/04.11.16.37/doc/Alves\\_inicio%20das%20chuvas.pdf](http://mtc-m16b.sid.inpe.br/attachment.cgi/sid.inpe.br/iris@1915/2005/04.11.16.37/doc/Alves_inicio%20das%20chuvas.pdf). Acesso em: 22 jul. 2025.

ASSAD, E.D.; ASSAD, M.L.R.C.L. Mudanças do clima e agropecuária: impactos, mitigação e adaptação. Desafios e oportunidades. **Estudos Avançados**, v. 38, p. 271-292, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.015>

BARRETO, G.S. Mapeamento ambiental da bacia hidrográfica da Lagoa Imboacica: Subsídio para construção de planos de bacia. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 3, n. 2, p. 125-144, 2009.

BARROSO, G.C.; MOLISANI, M.M. Pequenos estuários alimentados por pequenas bacias hidrográficas: estudo de caso dos estuários dos rios Macaé e das Ostras (RJ). Em: Ferreira M.I.P. et al. (Org.). **Engenharia Ciências Ambientais: contribuições à gestão ecossistêmica**. 1ed. Campos dos Goytacazes: Essentia Editora. 2019. v. 1, p. 116-141. DOI: <https://doi.org/10.19180/978-85-99968-58-1.6>

BERGAMIN, L. **Dinâmica espaço-temporal das cianobactérias em uma lagoa costeira no Norte do Rio de Janeiro (Lagoa Imboassica/Macaé)**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Conservação), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Macaé, 2020. Disponível em: [https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id\\_trabalho=9416313](https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=9416313). Acesso em 23 mai. 2024.

BRANCO, *et al.* Environmental changes and zooplankton temporal and spatial variation in a disturbed brazilian coastal lagoon. **Brazilian Journal of Biology**, v. 67, n. 2, p.251–262, mai. 2007. DOI : <https://doi.org/10.1590/S1519-69842007000200010>

CAIRES, S. A Comparative Simulation Study of the Annual Maxima and the Peaks-Over-Threshold Methods. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 138, p. 051601-1, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4033563>

CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of climate**, v. 17, n. 1, p. 88-108, jan. 2004. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2)

CEPED UFSC – CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012: Volume Rio de Janeiro**. 2 ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED/UFSC, 2013. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>. Acesso em: 23 mai. 2024.

CRIMMINS, A. *et al.* **The Impacts of Climate Change on Human Health in the United States: A Scientific Assessment**. Washington. Washington, DC: US Global Change Research Program. p. 312, 2016. DOI: <https://doi.org/10.7930/J0R49NQX>

COELHO, C.A.S. *et al.* The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11, p. 3737-3752, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>

COLES, S. **An introduction to statistical modeling of extreme values**. London: Springer, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>

COLES, S.G.; DIXON, M.J. Likelihood-based inference for extreme value models. **Extremes**, v. 2, n. 1, p. 5-23, 1999. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1009905222644>. Acesso em: 13 ago. 2025.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL LAGOS SÃO JOÃO - CILSJ. Água e Ambiente. **Revista do cenário ambiental da Região Hidrográfica Macaé-Ostras**, 2ª ed, n. 1, p. 2-32, jul. 2021. Disponível em: <[https://cilsj.org.br/wp-content/uploads/2022/05/Revista-Aguas-do-Macae-Julho-2021\\_2ed.pdf](https://cilsj.org.br/wp-content/uploads/2022/05/Revista-Aguas-do-Macae-Julho-2021_2ed.pdf)>. Acesso em 23 mai. 2024.

DERECZYNSKI, C.P.; OLIVEIRA, J.S. de.; MACHADO, C.O. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 24-38, mar. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000100003>

ERAZO, J.A.G. **Estudo de modelagem sobre a abertura da barra da Lagoa Imboassica – RJ**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: [https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufri-jpeno\\_upl//THESIS/10001808/2003\\_mestrado\\_jairo\\_alberto\\_guerrero\\_erazo\\_reduced\\_20210903153447338.pdf](https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufri-jpeno_upl//THESIS/10001808/2003_mestrado_jairo_alberto_guerrero_erazo_reduced_20210903153447338.pdf). Acesso em: 13 ago. 2025.

FARIAS, R.N. de. **De campo a cidade: urbanização e eutrofização artificial de um ecossistema aquático costeiro (Lagoa Imboassica, RJ)**. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Conservação), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Macaé, 2018. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/332549888\\_De\\_campo\\_a\\_cidade\\_urbanizacao\\_e\\_eutrofizacao\\_artificial\\_de\\_um\\_ecossistema\\_aquatico\\_costeiro\\_Lagoa\\_Imboassica\\_RJ\\_-\\_Tese\\_de\\_Doutorado](https://www.researchgate.net/publication/332549888_De_campo_a_cidade_urbanizacao_e_eutrofizacao_artificial_de_um_ecossistema_aquatico_costeiro_Lagoa_Imboassica_RJ_-_Tese_de_Doutorado)>. Acesso em 23 mai. 2024.

FARIAS, R. *et al.* O monitoramento ambiental como subsídio à gestão de ecossistemas aquáticos costeiros: o exemplo da lagoa Imboassica, RJ, Brasil. **Engenharia e ciências ambientais: contribuições à gestão ecossistêmica**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.19180/978-85-99968-58-1.10>

FERREIRA, N.J.; CAVALCANTI, I.F. de A. **Sistemas meteorológicos atuantes no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

FISHER, R. A.; TIPPETT, L. H.C. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *In: Mathematical proceedings of the Cambridge philosophical society*. Cambridge University Press, 1928. p. 180-190. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0305004100015681>

HANDMER, J. *et al.* Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems. *In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (ed. Field, C. B. *et al.*). Cambridge: Cambridge University Press, p. 231–290, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.007>

HOUZE, R.A.JR. Mesoscale convective systems. **Reviews of Geophysics**, v. 42, n. 4, dez. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004RG000150>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem (eds.)]. *In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33, 2022.

JENKINSON, A.F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) of meteorological elements. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 81, p. 158-171, 1955. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49708134804>

KUROKI, L.Y. *et al.* A vulnerabilidade social da região sudeste do Brasil frente à variabilidade climática. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 31, n. 18, p. 671–695, 2022. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15903>

LEOTTI, V.B.; BIRCK, A.R.; RIBOLDI, J. Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-smirnov, Anderson-Darling, Cramer–Von Mises e ShapiroWilk por Simulação. 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônômica e a, 50ª, Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS), **Anais**. Paraná, Londrina, 2005. Disponível em: [http://www.inf.ufsc.br/~verav/Testes\\_de\\_Hipoteses/Testes\\_aderencia.pdf](http://www.inf.ufsc.br/~verav/Testes_de_Hipoteses/Testes_aderencia.pdf). Acesso em 18 mai. 2024.

LIMA, A.S. **Gestão costeira e mudanças climáticas: Uma análise multiescalar da contribuição da legislação e da comunidade científica no Brasil**. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/229834>. Acesso em 09 out. 2025.

LISKA, G.R.; TEIXEIRA, O.M.; MIRES, P.A. de. Precipitações Máximas Mensais em Santa Maria, RS. **Nativa**, v. 11, n. 2, p. 226–232, 2023. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v11i2.14600>

LUIZ-SILVA, W.; OSCAR-JÚNIOR, A.C. Climate extremes related with rainfall in the State of Rio de Janeiro, Brazil: a review of climatological characteristics and recorded trends. **Natural Hazards**, v. 114, n. 1, p. 713-732, jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05409-5>

MONTEIRO, M.H.D. **Variação espaço-temporal da disponibilidade hídrica associada a índices de precipitação e uso e ocupação da terra no alto do curso do rio Macaé, sub-bacia Galdinópolis**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2024. Disponível em: <https://rima.ufrjr.br/jspui/handle/20.500.14407/19067>. Acesso em 09 out. 2025.

MONTGOMERY, D.C., PECK, E.; VINING, G. **Introduction to linear regression analysis**. John Wiley & Sons, 2021.

MOORE, D.S. **The Basic Practice of Statistics**. New York: W.H. Freeman and Company, 2010.

NÉTO, N.C.G; SANTOS, E.B. Análise Espaço-Temporal dos Eventos de Precipitação Intensa no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 1, p. 89-97, jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863710081>

NOBRE, C.A. *et al.* Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 2, p. 252-262, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.82022>

NUNES, E.D.; BORBA, L.L. Avaliação dos efeitos do adensamento urbano na dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas – Aparecida de Goiânia – GO. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 38, n. 2, p. 428–449, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5216/bgg.v38i2.54617>

OLIVEIRA, A.S. de. *et al.* Aplicabilidade da distribuição GEV ao estudo da precipitação máxima diária anual na região sul de Minas Gerais. **Revista Agrogeoambiental**, [S. l.], v. 6, n. 1, 2014. DOI: [10.18406/2316-1817v6n12014523](https://doi.org/10.18406/2316-1817v6n12014523)

PALUTIKOF, J.P. *et al.* A review of methods to calculate extreme wind speeds. **Meteorological applications**, v. 6, n. 2, p. 119-132, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1350482799001103>

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em 18 mai. 2024.

REBOITA, M.S. *et al.* Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 185-204, jun. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>

SANTANGELO, J.M. *et al.* Zooplankton responses to sandbar opening in a tropical eutrophic coastal lagoon. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 71, n. 3-4, p. 657-668, fev. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.09.021>

SANTOS, E.B.; LUCIO, P.S.; SILVA, C.M.S. Seasonal analysis of return periods for maximum daily precipitation in the Brazilian Amazon. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 3, p. 973-984, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0201.1>

SANTOS, R.F.B. dos; FERREIRA, M.I.P. Impactos negativos, positivos e propostas mitigadoras em bacias hidrográficas: estudo de caso da BH da Lagoa Imboassica (Macaé-RJ). **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 8, n. 2, p. 77-99, 2014. DOI: <https://doi.org/10.19180/2177-4560.v8n214-06>

SILVA, L.W. **Caracterização climatológica e mudanças climáticas no estado do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Wanderson-Silva-2/publication/329468416\\_Masters\\_Dissertation/links/5c0a53d192851c39ebd93ade/Masters-Dissertation.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Wanderson-Silva-2/publication/329468416_Masters_Dissertation/links/5c0a53d192851c39ebd93ade/Masters-Dissertation.pdf)>. Acesso em 18 mai. 2024.

SILVA, W.L.; DERECZYNSKI, C.P. **Caracterização climatológica e tendências observadas em extremos climáticos no estado do Rio de Janeiro**. Anuário do Instituto de Geociências, v. 37, n. 2, p. 123-138, dez. 2014. DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2014\\_2\\_123\\_138](http://dx.doi.org/10.11137/2014_2_123_138)

SIQUEIRA, J.R.; MARQUES, V. da S. Estudo de Caso de Sistemas Convectivos de Mesoescala Intensos Ocorridos entre os Dias 02 e 03 de Janeiro de 2013 no estado do Rio de Janeiro: Características Estruturais e Termodinâmicas. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 39, n. 2, p. 57-76, mar. 2016. DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2016\\_2\\_57\\_76](http://dx.doi.org/10.11137/2016_2_57_76)

SIQUEIRA, J.R.; MARQUES, V.S. Occurrence frequencies and trajectories of mesoscale convective systems over southeast Brazil related to cold frontal and nonfrontal incursions. **Australian Meteorological Magazine**, v. 57, p. 345-357, dez. 2008.

SILVA, W.L.; NASCIMENTO, M.X.; MENEZES, W.F. Atmospheric blocking in the South Atlantic during the summer 2014: a synoptic analysis of the phenomenon. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 5, n. 4, p. 386-393, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2015.54030>

SMITH, R.L. Maximum likelihood estimation in a class of nonregular cases. **Biometrika**, London, v. 72, n. 1, p. 67-90, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1093/biomet/72.1.67>

SOUZA, N.G.S. de *et al.* Uso de modelagem ecotoxicológica na Lagoa de Imboassica Macaé-RJ: uma breve análise. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 13, n. 2, p. 213-222, 2019.

TAVARES, L.P. da S.; SILVA, J.A.F. da.; JUNIOR, J.L. Estudo de propostas de mitigação de cheias como subsidio ao plano de recursos hídricos da região hidrográfica VIII-RJ. **Seminário Regional Sobre Gestão de Recursos Hídricos: Recuperação, Conservação e Gestão Ambiental de Bacias Hidrográficas – Práticas e Técnicas Inovadoras**, n. 5, 2016.

TAVARES, M.G.; SANTOS, E.B. Período de retorno das precipitações máximas diárias no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 30, p. 274-290, fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v30i18.15196>

VANDAELE, W. **Applied time series and Box-Jenkins models**. San Diego: Academic Press, 1983.

VIANA, L.S.C; SANTANA, G.R. de A.; SANTOS, E.B. Precipitações Máximas e a Resposta Hidrológica da Lagoa Imboassica, Macaé-RJ. **Revista Brasileira de Climatologia**, Artigo submetido para publicação, 2025.

## APÊNDICE A – SCRIPT R

Este apêndice apresenta o script desenvolvido em linguagem R utilizado nas etapas analíticas deste estudo. O código contempla procedimentos de importação, processamento e análise dos dados, incluindo cálculos estatísticos, aplicação de modelos e geração de gráficos.

```
#=====#
#Instalação e carregamento das bibliotecas necessárias-----#

pacotes <- c("tidyverse", "readxl", "ggrepel", "ggcorrplot", "patchwork",
            "gridExtra", "extRemes", "randtests", "evd")

for (p in pacotes) {
  if (!require(p, character.only = TRUE)) {
    install.packages(p, dependencies = TRUE)}
  library(p, character.only = TRUE, quietly = TRUE)}

#Importação dos dados-----#

# Leitura dos dados de nível da Lagoa de Imboassica:
Nivel_Imboassica <- read_excel(
  "Histórico Monitoramento de Nível _ Lagoa Imboassica .xlsx",
  sheet = "Plan1",
  col_types = c("date", rep("numeric", 12), "text", "text"),
  skip = 1) |>
  select(Data, `Nível da lagoa (cm)`) |>
  mutate(Data = lubridate::ymd(Data)) |>
  print()

# Leitura dos dados de precipitação da estação INMET:
Prec_INMET <- read_delim(
  "dados_A608_D_2006-09-21_2025-04-10.csv",
  delim = ";",
```

```

skip = 10,
na = "null",
col_names = TRUE,
locale = locale(decimal_mark = ",")
) |>
select(-...3) |>
rename(
  Data = `Data Medicao`,
  Prec = `PRECIPITACAO TOTAL, DIARIO (AUT)(mm)`
) |>
print()

```

### **#Verificação da sequência de datas e preenchimento de lacunas-----#**

# Criação de vetor com todas as datas do período:

```

Data.ref <- seq.Date(
  from = min(Prec_INMET$Data),
  to = max(Prec_INMET$Data),
  by = "day"
)

```

# Preenchimento de lacunas nos conjuntos de dados:

```

Nivel_Imboassica2 <- Nivel_Imboassica |>
full_join(data.frame(Data = Data.ref), by = "Data") |>
separate(Data, into = c("Ano", "Mes", "Dia"), sep = "-", remove = FALSE) |>
print()

```

```

Prec_INMET2 <- Prec_INMET |>
full_join(data.frame(Data = Data.ref), by = "Data") |>
separate(Data, into = c("Ano", "Mes", "Dia"), sep = "-", remove = FALSE) |>
filter(Ano >= 2007 & Ano <= 2024) |>
print()

```

### **#Junção dos dados e filtragem do período de interesse (2015–2023)-----#**

```

dados_final <- left_join(Prec_INMET2, Nivel_Imboassica2, by = "Data") |>
  filter(Ano.x >= 2015 & Ano.x <= 2023) |>
  select(Data, Ano.x, Mes.x, Dia.x, Prec, `Nível da lagoa (cm)` ) |>
  rename(
    Ano = Ano.x,
    Mes = Mes.x,
    Dia = Dia.x,
    Lagoa = `Nível da lagoa (cm)`
  ) |>
  print()

```

### **#Nomeação dos meses e criação da coluna de estações do ano-----#**

```

nomes_meses <- c("Jan", "Fev", "Mar", "Abr", "Mai", "Jun",
                "Jul", "Ago", "Set", "Out", "Nov", "Dez")

```

```

dados_final$Mes <- factor(dados_final$Mes,
                          levels = sprintf("%02d", 1:12),
                          labels = nomes_meses)

```

```

dados_final <- dados_final |>
  mutate(
    Est = case_when(
      Mes %in% c("Dez", "Jan", "Fev") ~ "Verão",
      Mes %in% c("Mar", "Abr", "Mai") ~ "Outono",
      Mes %in% c("Jun", "Jul", "Ago") ~ "Inverno",
      Mes %in% c("Set", "Out", "Nov") ~ "Primavera")) |>
  print()

```

# Definindo ordem dos níveis do fator 'Est':

```

dados_final$Est <- factor(dados_final$Est,
                          levels = c("Verão", "Outono", "Inverno", "Primavera"))

```

### **#Função para cálculo do percentual de valores ausentes (NA)-----#**

```
percentual_na <- function(x) {
  total_na <- sum(is.na(x))
  total_n <- length(x)
  (total_na / total_n) * 100}
```

# Aplicação da função para verificar falhas nas variáveis:

```
percentual_na(dados_final$Lagoa)
percentual_na(Prec_INMET2$Prec)
percentual_na(dados_final$Prec)
```

#=====

### **#Análise Exploratória da Precipitação Acumulada Diária e Mensal-----#**

# Filtrar os dados com precipitação maior que 1 (dias úmidos):

```
dados_final_p1 <- Prec_INMET2 |>
  filter(Prec > 1) |>
```

# Adicionar uma coluna correspondente às estações do ano:

```
mutate(
  Est = case_when(
    Mes %in% c("12", "01", "02") ~ "Verão",
    Mes %in% c("03", "04", "05") ~ "Outono",
    Mes %in% c("06", "07", "08") ~ "Inverno",
    Mes %in% c("09", "10", "11") ~ "Primavera"),
  Ano = as.factor(Ano))|>
print()
```

# Conversão da coluna 'Est' para fator ordenado:

```
dados_final_p1$Est <- factor(dados_final_p1$Est, levels = c("Verão", "Outono",
  "Inverno", "Primavera"))
```

### **#Gráfico de precipitação diária por mês com destaque para a média-----#**

```
grafico_diario_1 <- ggplot(dados_final_p1, aes(x = Mes, y = Prec)) +
  geom_boxplot(fill = "#386e9f", alpha = 0.7) + # Boxplot com cor e transparência.
  stat_summary(fun = mean, geom = "point", aes(color = "Média"), size = 2) + #
  Ponto da média.
  stat_summary(
    fun = mean, geom = "label", aes(label = round(..y.., 1)),
    fill = "white", alpha = 0.5, color = "#c81111", size = 3, vjust = -0.5
  ) + # Rótulo da média.
  scale_color_manual(name = "", values = c("Média" = "#c81111")) +
  labs(title = "a) Precipitação Acumulada Diária", x = "", y = "Precipitação (mm/dia)") +
  theme_minimal() +
  theme(
    legend.position = c(0.95, 1.1),
    legend.text = element_text(face = "bold"),
    plot.title = element_text(hjust = 0),
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1)
  ) +
  scale_y_continuous(breaks = seq(50, 200, 50), limits = c(0, 200))
```

### **#Cálculo da precipitação mensal acumulada-----#**

```
Pmensal <- Prec_INMET2 |>
  group_by(Mes, Ano) |>
  summarize(PrecM = sum(Prec, na.rm = FALSE), .groups = "drop")
```

# Classificação das estações do ano:

```
Pmensal <- Pmensal |>
  mutate(Est = case_when(
    Mes %in% c("Dez", "Jan", "Fev") ~ "Verão",
    Mes %in% c("Mar", "Abr", "Mai") ~ "Outono",
    Mes %in% c("Jun", "Jul", "Ago") ~ "Inverno",
    Mes %in% c("Set", "Out", "Nov") ~ "Primavera"))
```

```
# Conversão da coluna 'Est' para fator ordenado:
```

```
Pmensal$Est <- factor(Pmensal$Est, levels = c("Verão", "Outono", "Inverno",
"Primavera"))
```

### **#Gráfico de precipitação mensal por mês com destaque para a média-----#**

```
grafico_mensal_1 <- ggplot(Pmensal, aes(x = Mes, y = PrecM)) +
  geom_boxplot(fill = "#386e9f", alpha = 0.7) +
  stat_summary(fun = mean, geom = "point", aes(color = "Média"), size = 2) +
  stat_summary(
  fun = mean, geom = "label", aes(label = round(..y.., 1)),
  fill = "white", alpha = 0.5, color = "#c81111", size = 3, vjust = -0.5
  ) +
  scale_color_manual(name = " ", values = c("Média" = "#c81111")) +
  labs(title = "b) Precipitação Acumulada Mensal", x = "", y = "Precipitação
(mm/mês)") +
  theme_minimal() +
  theme(
  legend.position = c(0.95, 1),
  legend.text = element_text(face = "bold"),
  plot.title = element_text(hjust = 0),
  axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1)
  ) +
  scale_y_continuous(breaks = seq(50, 500, 100), limits = c(0, 400))
```

```
# Combinação dos gráficos:
```

```
gridExtra::grid.arrange(grafico_diario_1, grafico_mensal_1, ncol = 1)
```

### **#Gráfico de precipitação diária por estação-----#**

```
grafico_diario_2 <- ggplot(dados_final_p1, aes(x = Est, y = Prec)) +
  geom_boxplot(fill = "#386e9f", alpha = 0.7) +
  stat_summary(fun = mean, geom = "point", aes(color = "Média"), size = 2) +
  stat_summary(
```

```

    fun = mean, geom = "label", aes(label = round(..y.., 1)),
    fill = "white", alpha = 0.5, color = "#c81111", size = 3, vjust = -0.5
  ) +
  scale_color_manual(name = " ", values = c("Média" = "#c81111")) +
  labs(title = "a) Precipitação Acumulada Diária", x = " ", y = "Precipitação (mm/dia)")
+
  theme_minimal() +
  theme(
    legend.position = c(0.9, 1.05),
    legend.text = element_text(face = "bold"),
    plot.title = element_text(hjust = 0),
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1)
  )

```

# Gráfico de precipitação mensal por estação:

```

grafico_mensal_2 <- ggplot(Pmensal, aes(x = Est, y = PrecM)) +
  geom_boxplot(fill = "#386e9f", alpha = 0.7) +
  stat_summary(fun = mean, geom = "point", aes(color = "Média"), size = 2) +
  stat_summary(
    fun = mean, geom = "label", aes(label = round(..y.., 1)),
    fill = "white", alpha = 0.5, color = "#c81111", size = 3, vjust = -0.5
  ) +
  scale_color_manual(name = " ", values = c("Média" = "#c81111")) +
  labs(title = "b) Precipitação Acumulada Mensal", x = " ", y = "Precipitação
(mm/mês)") +
  theme_minimal() +
  theme(
    legend.position = c(0.9, 1.05),
    legend.text = element_text(face = "bold"),
    plot.title = element_text(hjust = 0),
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1)
  )

```

# Combinação dos gráficos:

```
gridExtra::grid.arrange(grafico_diario_2, grafico_mensal_2, ncol = 2)
```

### **#Identificação dos máximos anuais da precipitação diária-----#**

```
maximos_anuais_p <- Prec_INMET2 |>
  group_by(Ano) |>
  slice_max(order_by = Prec, n = 1, with_ties = FALSE) |>
  ungroup() |>
  print()
```

### **#Gráfico de Precipitação com Destaque nos Máximos Anuais-----#**

```
grafico_maximos <- ggplot(Prec_INMET2, aes(x = Data, y = Prec)) +
  geom_line(color = "#386e9f") + # Linha de precipitação diária.
  geom_point(data = maximos_anuais_p, aes(x = Data, y = Prec), # Pontos nos
    color = "#c81111", size = 2
  ) +
# Rótulos com valores e datas nos máximos:
  geom_label_repel(
    data = maximos_anuais_p,
    aes(label = paste0(round(Prec, 1), " mm\n(", format(Data, "%d-%m-%Y"), ")")),
    size = 3, color = "#c81111", fill = "white", alpha = 0.7,
    box.padding = 0.5, max.overlaps = Inf
  ) +
  labs(
    title = "Máximos Anuais de Precipitação",
    x = "Ano", y = "Precipitação (mm/dia)"
  ) +
  scale_x_date(
    date_labels = "%Y",
    breaks = seq(as.Date("2007-01-01"), as.Date("2024-12-30"), by = "1 year")
  ) +
  scale_y_continuous(
```

```

    breaks = seq(50, 200, by = 50), limits = c(0, 200)
  ) +
  theme_minimal() +
  theme(
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1),
    plot.title = element_text(face = "bold", hjust = 0)
  )
print(grafico_maximos)

#=====#
#Análise Exploratória do Nível da Lagoa de Imboassica-----#

#Identificação dos máximos anuais do nível da lagoa-----#

# Agrupar os dados por ano e filtrar os registros com o maior nível da lagoa em cada
ano:
maximos_anuais <- dados_final |>
  group_by(Ano) |>
  filter(Lagoa == max(Lagoa, na.rm = TRUE)) |>
  ungroup() |>
  print()

#Distribuição do nível da lagoa por estação do ano-----#

# Gerar histograma com curva de densidade para cada estação:
ggplot(dados_final, aes(x = Lagoa)) +
  geom_histogram(aes(y = ..density..),
    bins = 30,
    fill = "#386e9f",
    alpha = 0.7) +
  geom_density(color = "#c81111") + # Curva de densidade.
  labs(x = "Nível da Lagoa (cm)", y = "Densidade") +
  scale_y_continuous(limits = c(0, 0.04),
    breaks = seq(0, 0.04, by = 0.01)) +

```

```

theme_minimal() +
theme(
  legend.position = "none",
  legend.text = element_text(face = "bold"),
  plot.title = element_text(hjust = 0),
  axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1)
) +
facet_wrap(~Est) # Distribuição por estação do ano.

```

### **#Gráfico temporal com destaque nos máximos anuais-----#**

# Gerar gráfico de linha com pontos destacados nos máximos anuais e rótulos informativos:

```

dados_final |>
  ggplot(aes(x = Data, y = Lagoa)) +
  geom_line(color = "#386e9f") + # Linha principal da série temporal.
  geom_point(data = maximos_anuais, aes(x = Data, y = Lagoa),
    color = "#c81111", size = 2) + # Pontos destacados.
  geom_label_repel(data = maximos_anuais,
    aes(label = paste0(round(Lagoa, 1), " cm\n(", format(Data, "%d-%m-%Y"), ")")),
    size = 2.5,
    color = "#c81111",
    fill = "white",
    alpha = 0.7,
    box.padding = 0.5,
    max.overlaps = Inf) + # Evita sobreposição de rótulos.
  labs(
    title = "Máximos Anuais do Nível da Lagoa de Imboassica",
    x = "Ano",
    y = "Nível da Lagoa (cm)"
  ) +
  scale_x_date(date_labels = "%Y",

```

```

        breaks = seq(as.Date("2007-01-01"), as.Date("2024-12-30"), by = "1 year"))
+
  scale_y_continuous(breaks = seq(0, 200, by = 50), limits = c(0, 200)) +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1))

#=====#
#Relação Entre o Nível da Lagoa de Imboassica e a Precipitação Acumulada
Diária-----#

#Organizando os dados com defasagens de precipitação-----#

dados_defasados <- dados_final |>
  arrange(Data) |>
  mutate(
    Prec_anterior1 = lag(Prec, 1),
    Prec_anterior2 = lag(Prec, 2),
    Prec_anterior3 = lag(Prec, 3),
    Prec_anterior4 = lag(Prec, 4)) |>
  print()

# Selecionando apenas os dias com nível da Lagoa diferente de zero:
dados_filtrados <- dados_defasados |>
  filter(Lagoa != 0) |>
  print()

#Correlação cruzada entre as séries temporais-----#

ts_prec <- ts(dados_filtrados$Prec)
ts_lagoa <- ts(dados_filtrados$Lagoa)

ccf(ts_prec, ts_lagoa, lag.max = 5, na.action = na.pass,
     type = "correlation",
     main = "Correlação Cruzada Entre Precipitação e Nível da Lagoa",

```

```
xlab = "Defasagem (Dias)",
ylab = "Coeficiente de Correlação")
```

### **#Identificação dos máximos anuais do nível da Lagoa-----#**

```
maximos_anuais_l <- dados_filtrados |>
  group_by(Ano) |>
  slice_max(order_by = Lagoa, n = 1, with_ties = FALSE) |>
  ungroup() |>
  print()
```

### **#Identificação do top 2 precipitações diárias anuais-----#**

```
maximos_anuais_p2 <- dados_filtrados |>
  group_by(Ano) |>
  slice_max(order_by = Prec, n = 2, with_ties = FALSE) |>
  ungroup() |>
  print()
```

### **#Matriz de correlação entre as variáveis-----#**

# Função para gerar matriz de correlação:

```
gera_corr_plot <- function(df, titulo) {
  vars <- c("Lagoa", "Prec", "Prec_anterior1", "Prec_anterior2",
           "Prec_anterior3", "Prec_anterior4")
```

# Nomes personalizados para exibição:

```
nomes_var <- c("Nível da Lagoa", "P lag0",
              "P lag1", "P lag2",
              "P lag3", "P lag4")
```

# Calcular a correlação e p-valor:

```
cor.dados <- cor(select(df, all_of(vars)), use = "complete.obs", method = "pearson")
co_p <- cor_pmat(select(df, all_of(vars)), use = "complete.obs")
```

```

# Renomeia as linhas e colunas da matriz de correlação:
colnames(cor.dados) <- nomes_var
rownames(cor.dados) <- nomes_var
colnames(co_p) <- nomes_var
rownames(co_p) <- nomes_var

# Criar vetor com apenas o primeiro nome visível no eixo Y:
ggcorrplot(
  corr = cor.dados,
  method = "circle",
  type = "lower",
  hc.order = FALSE,
  p.mat = co_p,
  insig = "pch",
  sig.level = 0.05,
  colors = c("gold2", "white", "darkblue"),
  lab = TRUE
) +
  ggtitle(titulo) +
  scale_y_discrete(labels = nomes_var) +
  theme(axis.text.y = element_text(size = 12),
        axis.text.x = element_text(size = 12),
        axis.ticks.y = element_blank(),
        legend.position = "right")}

grafico1 <- gera_corr_plot(dados_filtrados,
                          "a) Séries temporais filtradas (Nível da Lagoa ≠ 0)")
grafico2 <- gera_corr_plot(maximos_anuais_p2,
                          "b) Top 2 Precipitações Diárias Anuais vs. Nível da Lagoa")

# Combina os dois gráficos lado a lado com legenda compartilhada:
grafico_combinado <- grafico1 + grafico2 +
  plot_layout(guides = "collect") & theme(legend.position = "right")

```

```
print(grafico_combinado)
```

### **#Modelos de regressão linear com diferentes defasagens-----#**

```
modelos <- list(
  lm(Lagoa ~ Prec, data = maximos_anuais),
  lm(Lagoa ~ Prec_anterior1, data = maximos_anuais_p2),
  lm(Lagoa ~ Prec_anterior2, data = maximos_anuais_p2),
  lm(Lagoa ~ Prec_anterior3, data = maximos_anuais_p2),
  lm(Lagoa ~ Prec_anterior4, data = maximos_anuais_p2)
)
```

```
# Extração de coeficientes e R²:
```

```
coef_r2 <- lapply(modelos, function(m) {
  list(coef = coef(m), r2 = summary(m)$r.squared)
})
```

### **#Visualização dos modelos de regressão-----#**

```
plot_regressao <- function(data, xvar, yvar, coef, r2, titulo, xlab) {
  ggplot(data, aes_string(x = xvar, y = yvar)) +
    geom_point(alpha = 0.7) +
    geom_smooth(method = "lm", se = FALSE, color = "#c81111") +
    annotate("text", x = 10, y = 175,
      label = sprintf("y = %.2f + %.2f·x, R² = %.2f", coef[1], coef[2], r2),
      hjust = 0, fontface = "italic") +
    labs(title = titulo, x = xlab, y = "Nível da Lagoa (cm)") +
    scale_y_continuous(limits = c(80, 180), breaks = seq(80, 180, 20)) +
    # scale_x_continuous(limits = c(0, 180), breaks = seq(0, 180, 20)) +
    theme_minimal() +
    theme(plot.title = element_text(hjust = 0, size = 12),
      axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1))}
```

```
glag0 <- plot_regressao(maximos_anuais_p2, "Prec", "Lagoa", coef_r2[[1]]$coef,
coef_r2[[1]]$r2,
```

```
  "a) Nível da Lagoa x Precipitação Lag (0)", "Precipitação (mm/dia)")
```

```
glag1 <- plot_regressao(maximos_anuais_p2, "Prec_anterior1", "Lagoa",
coef_r2[[2]]$coef, coef_r2[[2]]$r2,
```

```
  "b) Nível da Lagoa x Precipitação Lag (1)", "Precipitação (mm/dia)")
```

```
glag2 <- plot_regressao(maximos_anuais_p2, "Prec_anterior2", "Lagoa",
coef_r2[[3]]$coef, coef_r2[[3]]$r2,
```

```
  "c) Nível da Lagoa x Precipitação Lag (2)", "Precipitação (mm/dia)")
```

```
# Combinação dos gráficos:
```

```
gridExtra::grid.arrange(glag0, glag1, glag2, ncol = 3)
```

```
#=====
```

```
#Modelagem das Precipitações Máximas Usando a Distribuição GEV-----#
```

```
# Visualizar os dados de Macaé:
```

```
print(Prec_INMET2)
```

```
# Adicionar uma coluna correspondente às estações do ano:
```

```
MAC <-
```

```
  Prec_INMET2 |>
```

```
  mutate(
```

```
    Est = case_when(
```

```
      Mes %in% c("12", "01", "02") ~ "Verão",
```

```
      Mes %in% c("03", "04", "05") ~ "Outono",
```

```
      Mes %in% c("06", "07", "08") ~ "Inverno",
```

```
      Mes %in% c("09", "10", "11") ~ "Primavera"),
```

```
    Ano = as.factor(Ano))|>      # Converte o ano para fator.
```

```
  print()
```

```
# Precipitação máxima anual:
```

```

prec_max_anual <- MAC |>
  group_by(Ano) |>
  summarise(Est = "Anual", Precmax = max(Prec, na.rm = TRUE))

# Precipitação máxima por estação:
prec_max_est <- MAC |>
  group_by(Ano, Est) |>
  summarise(Precmax = max(Prec, na.rm = TRUE))

# Aplicar Runs Test e ACF por categoria (Anual + Estações)
# Runs Test: Teste de aleatoriedade.
# Avaliar se a sequência de precipitações máximas anuais é aleatória.
# Um p-valor > 0.05 não rejeita a hipótese de aleatoriedade.
runs.test(prec_max_anual$Precmax)

# ACF: Visualizar autocorrelação da série temporal.
# Identifica dependência temporal entre os anos.
# Picos em lags específicos podem indicar persistência ou sazonalidade.
acf(prec_max_anual$Precmax)

# Lista de estações:
estacoes <- unique(prec_max_est$Est)

# Definir layout da figura: 2 linhas, 2 colunas.
par(mfrow = c(2, 2))

# Loop por estação:
for (est in estacoes) {

  cat("\n\n==== Estação:", est, "====\n")

  # Filtrar os dados da estação:
  dados_est <- prec_max_est |>
    filter(Est == est) |>

```

```

arrange(Ano) |>
pull(Precmax)

# Aplicar Runs Test:
cat("Runs Test:\n")
rt <- runs.test(dados_est)
print(rt)

# Aplicar ACF:
acf(dados_est, main = paste("Autocorrelação:\n", est), col = "blue")

#Ajuste do modelo GEV-----#

fitGEV <- fevd(prec_max_anual$Precmax,
  type = "GEV",
  method = "MLE",
  units = "mm",
  time.units = "days")

par(mfrow = c(1, 1))

# Curva de níveis de retorno:
plot(fitGEV, type = "rl", col = "blue", ann = FALSE,
  ylim = c(0, 600))

# Adicionar rótulos personalizados:
title(xlab = "Período de Retorno (anos)",
  ylab = "Nível de de Retorno (mm)")

# Gráfico QQ para avaliar ajuste do modelo:
plot(fitGEV, type = "qq", main = "", col = "red")

#Estimar níveis de retorno para diferentes períodos:
return.level(fitGEV, do.ci = FALSE, return.period = c(2,5,10,25,50,100))

```

## #Ajuste da distribuição GEV aos dados-----#

# Extração dos parâmetros ajustados

```
params <- fitGEV$results$par
```

```
loc <- params["location"]
```

```
scale <- params["scale"]
```

```
shape <- params["shape"]
```

# Definição da função de distribuição acumulada GEV

```
pgev_custom <- function(x) {
```

```
  pgev(x, loc = loc, scale = scale, shape = shape)
```

```
}
```

# Aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov:

# Hipótese nula ( $H_0$ ): Os dados seguem a distribuição GEV ajustada.

# Hipótese alternativa ( $H_1$ ): Os dados não seguem a distribuição GEV.

```
ks_result <- ks.test(prec_max_anual$Precmax, pgev_custom)
```

```
print(ks_result)
```

```
alpha <- 0.05
```

```
if (ks_result$p.value <= alpha) {
```

```
  cat("O ajuste do modelo GEV não é adequado aos dados com um nível de  
significância de 5%.\n")
```

```
} else {
```

```
  cat("✓ O ajuste do modelo GEV é adequado aos dados com um nível de  
significância de 5%.\n")
```

```
}
```

# Ajuste do modelo GEV por estação do ano:

# Definir ordem desejada das estações

```
estacoes <- c("Verão", "Outono", "Inverno", "Primavera")
```

```

# Ajuste do layout para 2x2
par(mfrow = c(2, 2), mar = c(4.5, 4.5, 2, 1)) # margens ajustadas

# Loop por estação:
for (est in estacoes) {

  cat("\n\n==== Estação:", est, "====\n")

# Filtrar os dados da estação:
dados_est <- prec_max_est |>
  filter(Est == est) |>
  arrange(Ano) |>
  pull(Precmax)

# Ajustar modelo GEV:
fitGEV_est <- fevd(dados_est,
  type = "GEV", method = "MLE",
  units = "mm", time.units = "days")

# Curva de níveis de retorno:
plot(fitGEV_est, type = "rl", col = "blue", ann = FALSE,
  ylim = c(0, 600))

# Adicionar rótulos personalizados:
title(xlab = "Período de Retorno (anos)",
  ylab = "Nível de de Retorno (mm)")

# Adicionar título alinhado à esquerda:
mtext(est, side = 3, adj = 0, line = 0.5, font = 2, cex = 1.0)

# Estimar níveis de retorno:
cat("Níveis de retorno:\n")
print(return.level(fitGEV_est, do.ci = FALSE, return.period = c(2,5,10,25,50,100)))

```

```
# Teste KS
params <- fitGEV_est$results$par
loc <- params["location"]
scale <- params["scale"]
shape <- params["shape"]

pgev_custom <- function(x) {
  pgev(x, loc = loc, scale = scale, shape = shape)}

ks_result <- ks.test(dados_est, pgev_custom)
print(ks_result)

if (ks_result$p.value <= 0.05) {
  cat("✘ O ajuste do modelo GEV NÃO é adequado para", est, "com 5% de
significância.\n")
} else {
  cat("✔ O ajuste do modelo GEV é adequado para", est, "com 5% de
significância.\n")}}
#=====#
```