

**PROGNÓSTICO DE NÍVEIS DO RIO NEGRO PARA O
PERÍODO DE VAZANTE DE 2025:**

ESTAÇÃO MANAUS – RIO NEGRO

NOTA TÉCNICA

Brasília, 16 de setembro de 2025

**PROGNÓSTICO DE NÍVEIS DO RIO NEGRO PARA O
PERÍODO DE VAZANTE DE 2025:**

ESTAÇÃO MANAUS – RIO NEGRO

NOTA TÉCNICA

Marcus Suassuna Santos

Bruna Gomes Amancio

Artur José Soares Matos

André Martinelli Santos

SUMÁRIO

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO E OBJETIVOS | 4 |
| 2 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 5 |
| 2.1 | Dados hidrológicos | 5 |
| 3 | ANÁLISE DE MÍNIMAS ANUAIS | 7 |
| 3.1 | Estatísticas Descritivas | 7 |
| 3.2 | Análise da estacionariedade e tendência..... | 8 |
| 3.3 | Ajuste da Distribuição Normal | 10 |
| 4 | ANÁLISE DE DURAÇÃO DE EVENTOS | 11 |
| 4.1 | Análise de frequência..... | 11 |
| 4.2 | Correlação com mínimas anuais | 12 |
| 5 | PROGNÓSTICOS PARA 2025 | 13 |
| 5.1 | Prognóstico por semelhança dos cotogramas..... | 13 |
| 5.2 | Prognóstico por Teleconexões Climáticas | 14 |
| 6 | COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS | 18 |
| 7 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 19 |

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O Rio Negro, um dos principais afluentes da margem esquerda do Rio Amazonas, possui a estação fluviométrica de Manaus (código 14990000) como ponto estratégico para o monitoramento hidrológico e a gestão de recursos hídricos na região. O regime do rio é marcado por uma sazonalidade bem definida, com períodos de cheia e vazante que impactam diretamente a navegação, o abastecimento público e os ecossistemas locais. A Figura 1.1 ilustra a bacia do rio até a estação Manaus e destaca as principais estações fluviométricas em operação na região.

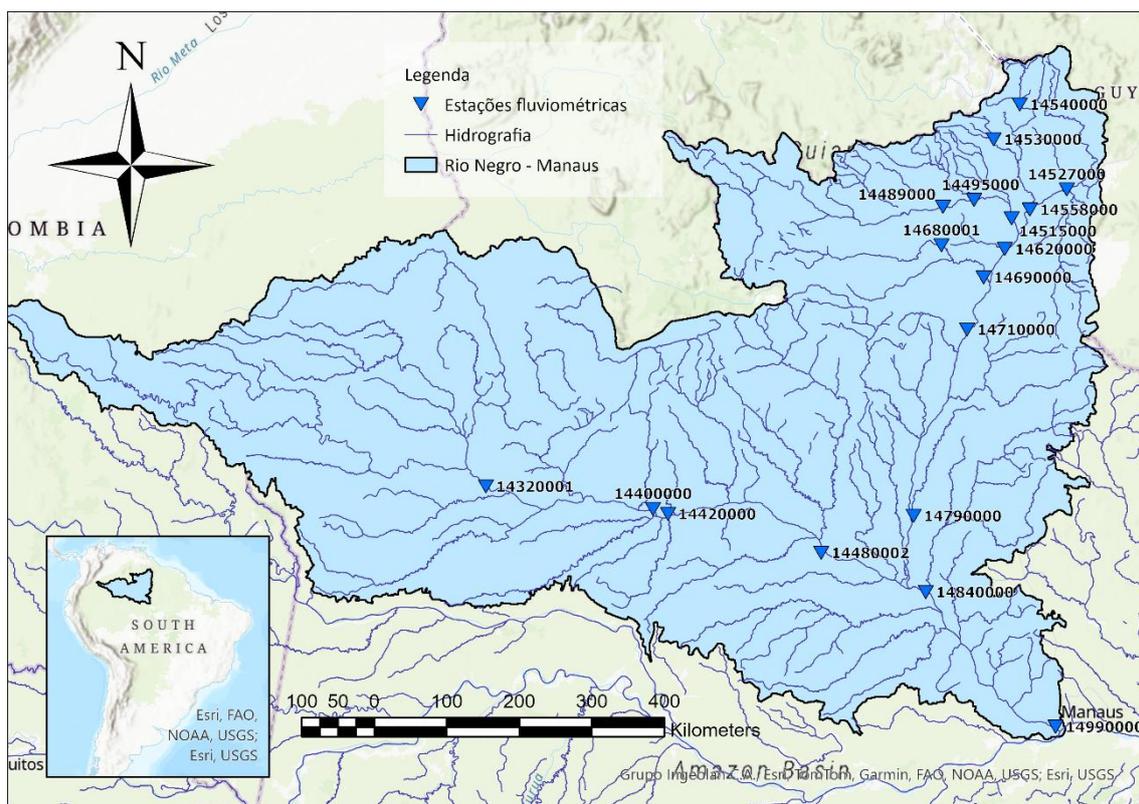


Figura 1.1: Bacia do rio Negro até a estação Manaus (14990000).

Eventos recentes de seca severa, como o registrado em 2024 – quando o nível mínimo atingiu 1213 cm, o mais baixo da série histórica –, destacam a vulnerabilidade do sistema e a necessidade de ferramentas aprimoradas para previsão e gestão de riscos. Essa variabilidade hidrológica é influenciada por forçantes climáticas de grande escala, em especial o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENSO), que modula os padrões de precipitação na Amazônia.

As informações sobre a bacia do Rio Negro vêm sendo constantemente demandadas ao SGB/CPRM por diversas instituições, público e privadas. Por esta razão, a equipe do SGB/CPRM produziu esta Nota Técnica para comunicar à comunidade o cenário para 2025 relacionado à vazante do rio, com foco na estação de Manaus. A referida estação é de responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), e é operada pelo SGB.

Os objetivos específicos dessa Nota Técnica incluem:

- Realizar uma análise estatística da série histórica de níveis mínimos anuais e da duração de eventos de estiagem;
- Investigar a existência de tendências de longo prazo e a influência de teleconexões climáticas, como o ENSO e a Oscilação Decadal do Pacífico (PDO);
- Elaborar prognósticos para a vazante de 2025 utilizando dois métodos independentes: analogia hidrológica por semelhança de cotogramas e análise de correlação com índices climáticos;
- Comparar os cenários gerados pelos diferentes métodos para estabelecer um prognóstico e apresentar conclusões e recomendações para a gestão operacional.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Dados hidrológicos

Este estudo utilizou dados diários de nível d'água da estação fluviométrica Manaus, localizada no rio Negro (código 14990000). A série temporal analisada compreende o período de 1903 a 2025, totalizando 122 anos completos de dados (Figura 2.1). A série evidencia uma sazonalidade marcante, característica típica dos rios amazônicos, com ciclos anuais bem definidos de cheias e secas. A linha vermelha representa uma avaliação da tendência temporal da série, que indica oscilações de comportamento ao longo dos anos no que diz respeito às vazões médias diárias. Destaca-se o período dos anos 1960, que apresentou níveis mais baixos que a média, seguido de um período com níveis mais elevados nos anos 1970. Os anos de 2010 também foram marcados por uma elevação dos níveis médios seguido de uma abrupta redução dos níveis em razão principalmente dos anos mais secos do histórico, que foram os anos de 2023 e 2024. Análises específicas de extremos serão feitas no item 3.2.

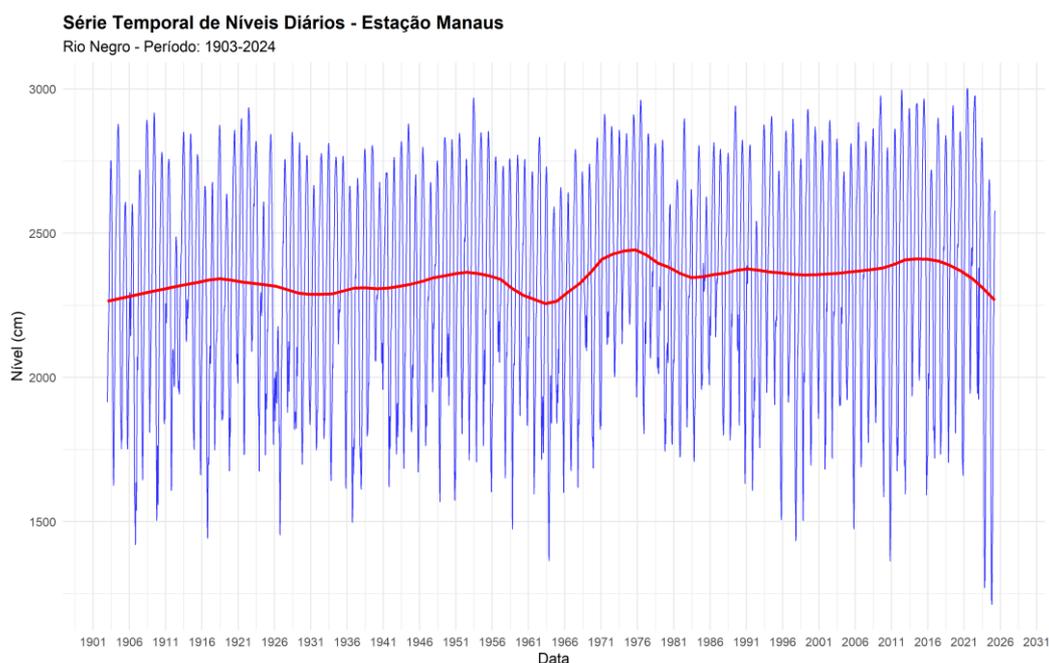


Figura 2.1: Série histórica de níveis médios diários na estação de Manaus entre 1903 e 2024. A linha vermelha indica a tendência de longo prazo ajustada por meio de regressão polinomial local (loess).

A Figura 2.2 apresenta a sazonalidade do Rio Negro na estação de Manaus, cada linha colorida ilustra o nível da água (em cm) para um ano específico. É possível observar um padrão sazonal bem definido, com um período de cheia ocorrendo entre maio a julho, atingindo picos que podem chegar aos 30 m (como aquele observado na cheia recorde de 2021), e um período de vazante de agosto a dezembro, com níveis mínimos que chegaram a 12,13 m durante a seca extrema de 2024. A variação média, porém, ocorre entre aproximadamente 28 m na máxima e 17,50 m na mínima (amplitude média de 10,50 m).

Além da sazonalidade, o gráfico sugere uma tendência de longo prazo, onde anos mais recentes (linhas em tons claros de verde e amarelo) mostram picos de cheia mais elevados e níveis de vazante mais baixos em comparação com anos anteriores (linhas em tons de roxo e azul). Isso pode indicar um possível aumento na amplitude da variação do nível do rio ao longo das décadas, o qual pode estar relacionado à ocorrência de eventos hidrológicos extremos ou uma concentração das chuvas em uma janela mais curta de tempo.

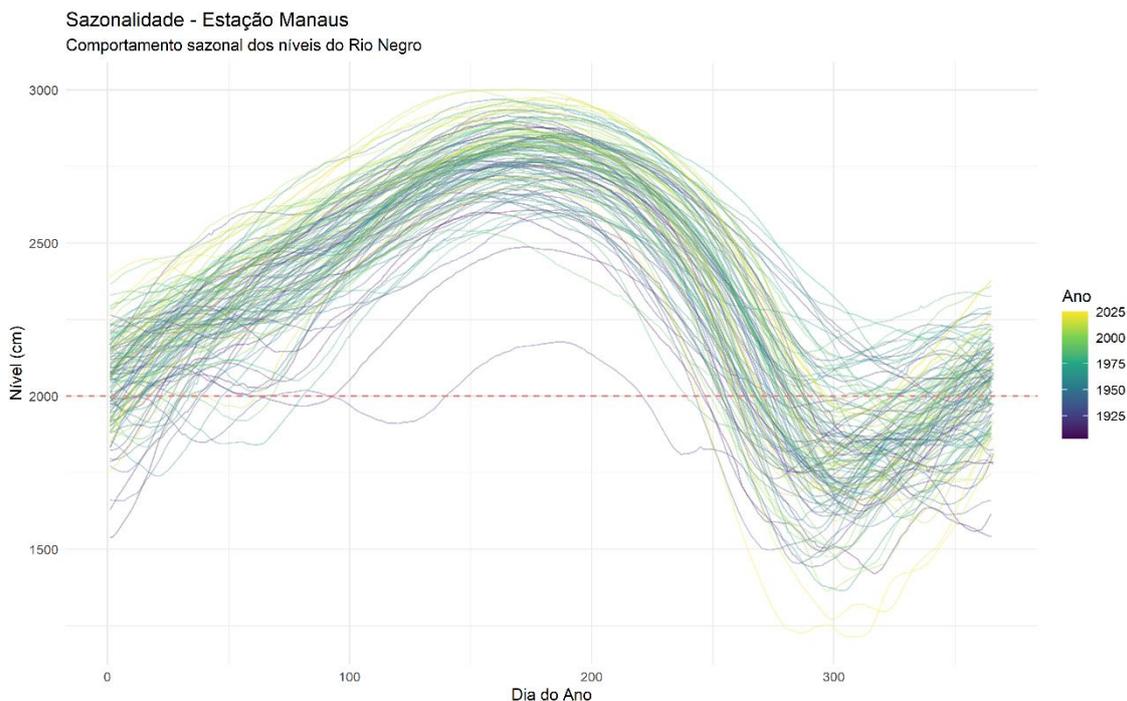


Figura 2.2: Sazonalidade dos níveis do rio Negro na estação Manaus.

A Figura 2.3 ilustra um gráfico do mês de ocorrência das mínimas anuais na série histórica. Os dados indicam que as mínimas anuais ocorreram predominantemente em outubro (43,80%) ou novembro (35,54%), seguido por dezembro e janeiro (9,92% cada), o que sugere que o período mais crítico da estação de seca, em média, ocorre entre outubro e novembro.

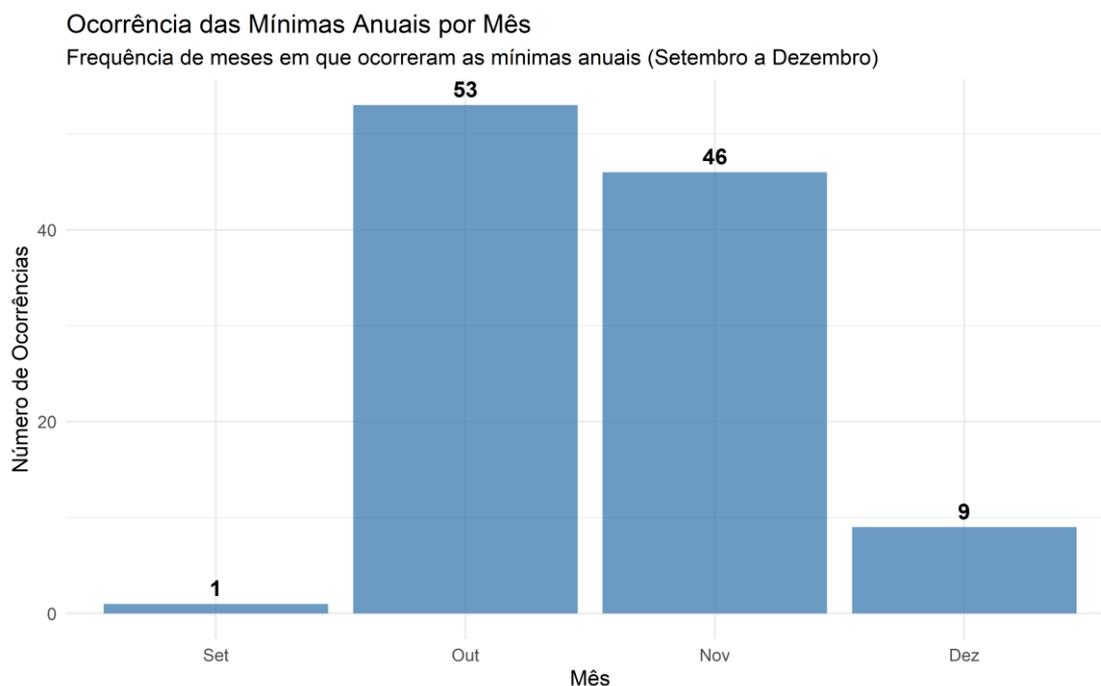


Figura 2.3: Distribuição mensal de ocorrência das mínimas anuais

A análise da série temporal dos níveis diários do Rio Negro na estação de Manaus reforça a sazonalidade marcante de cheias e vazantes, típica da região amazônica. O gráfico de sazonalidade, por sua vez, sugere uma amplitude hidrológica maior nos anos mais recentes. A análise do mês de ocorrência dos níveis mínimos anuais mostra que o período de vazante mais crítico ocorre predominantemente entre outubro e novembro, consolidando essa fase como o ápice da estação seca. Em conjunto, essas análises fornecem uma compreensão abrangente do regime hidrológico do Rio Negro.

3 ANÁLISE DE MÍNIMAS ANUAIS

3.1 Estatísticas Descritivas

A Tabela 3.1 apresenta os 10 valores mínimos anuais registrados no período de análise, os quais estão numa faixa de 12 a 15 m. O ano de 2024 foi o mais crítico, onde a estação chegou a apresentar cota mínima de 1213 cm.

Tabela 3.1: Menores valores de mínimas anuais para a estação fluviométrica de Manaus

| ANO | MÍNIMA ANUAL (CM) |
|-------------|-------------------|
| 2024 | 1213 |
| 2023 | 1270 |
| 2010 | 1363 |
| 1963 | 1364 |
| 1906 | 1420 |
| 1997 | 1434 |
| 1916 | 1442 |
| 1926 | 1454 |
| 1958 | 1474 |
| 2005 | 1475 |

Na Tabela 3.2 são apresentadas uma série de estatísticas descritivas mensais dos níveis do período para a estação fluviométrica de Manaus, apresentando médias, medianas, desvios-padrão, mínimos, máximos mensais, além do primeiro e terceiro quartis. Os dados de média e mediana da Tabela 3.2 confirmam o padrão sazonal identificado na Figura 2.2. Esses dados permitem identificar os meses de pico de cheia, maio a julho, e os meses de pico de seca, outubro e novembro. Já os dados de desvio padrão revelam que os meses com maior variação de nível são setembro e outubro, os quais correspondem ao período de vazante, enquanto o período de cheias tende a ser mais consistente. Esse desvio padrão elevado sugere a maior variabilidade dos níveis de seca, o que, por sua vez, implica em uma menor previsibilidade desses níveis no trecho de Manaus.

Os valores de Mínimo e Máximo reforçam a grande amplitude dos níveis do rio ao longo do ano, com diferenças de até 14 m entre o valor mínimo e máximo já registrado em um mês. A análise dos quartis oferece uma visão mais precisa, e confirma o que foi observado pelos dados de desvio padrão. Durante o pico de secas em novembro 75% dos dados de nível do rio ficam abaixo de 1961 cm (Q3), enquanto 25% estão abaixo de 1736 cm (Q1), evidenciando que, mesmo no pico da seca, os níveis variam significativamente. Já durante a cheia em junho, a maior parte dos dados (50% centrais) se concentra entre 2715 cm (Q1) e 2853 cm (Q3), o que destaca o alto nível recorrente nesse mês.

Tabela 3.2: Estatísticas descritivas mensais dos níveis da estação fluviométrica de Manaus: médias, medianas, desvios padrão, mínimos, máximos, primeiro e terceiro quartis (estimativas em cm).

| <i>Mês</i> | <i>Média</i> | <i>Mediana</i> | <i>DP</i> | <i>Mínimo</i> | <i>Máximo</i> | <i>Q1</i> | <i>Q3</i> |
|------------|--------------|----------------|-----------|---------------|---------------|-----------|-----------|
| <i>Jan</i> | 2129 | 2144 | 151 | 1539 | 2469 | 2037 | 2234 |
| <i>Fev</i> | 2278 | 2282 | 142 | 1824 | 2624 | 2202 | 2379 |
| <i>Mar</i> | 2408 | 2428 | 157 | 1841 | 2767 | 2313 | 2516 |
| <i>Abr</i> | 2560 | 2573 | 148 | 1910 | 2920 | 2477 | 2660 |
| <i>Mai</i> | 2705 | 2721 | 135 | 1912 | 2997 | 2639 | 2784 |
| <i>Jun</i> | 2778 | 2794 | 120 | 2089 | 3002 | 2715 | 2853 |
| <i>Jul</i> | 2744 | 2764 | 129 | 2071 | 2994 | 2676 | 2829 |
| <i>Ago</i> | 2576 | 2607 | 180 | 1808 | 2908 | 2479 | 2707 |
| <i>Set</i> | 2235 | 2264 | 254 | 1319 | 2754 | 2059 | 2430 |
| <i>Out</i> | 1884 | 1866 | 231 | 1215 | 2524 | 1739 | 2050 |
| <i>Nov</i> | 1847 | 1842 | 179 | 1213 | 2282 | 1736 | 1961 |
| <i>Dez</i> | 1971 | 1980 | 164 | 1438 | 2379 | 1865 | 2083 |

3.2 Análise da estacionariedade e tendência

A análise de tendências de longo prazo para a estação de Manaus revela um comportamento cíclico significativo entre os extremos hidrológicos. Para as mínimas anuais (Figura 3.1), não é identificada uma tendência monotônica ao longo de toda a série histórica, mas ciclos de longo prazo. Entre 1950 e 1970 observou-se um aumento das mínimas anuais e dos anos 1970 até a data presente, a tendência tem sido de redução dos mínimos a uma taxa de -4,3 cm/ano. Este resultado indica vazantes mais extremas desde 1970, com as cotas mínimas tornando-se sistematicamente mais baixas ao longo dos últimos cinquenta e cinco anos.

Em contraste, a análise das máximas anuais aponta para uma tendência positiva, estatisticamente significativa ao nível de 5% ($p\text{-value} = 0,1086$); Teste de Mann-Kendall),

com uma taxa de aumento estimada em $+1,1$ cm/ano (Figura 3.2-a). Essa direção positiva da tendência é consistente com observações em outras bacias amazônicas.

A conjugação desses dois fenômenos — a redução significativa das mínimas e a tendência de aumento das máximas — sugere um aumento da amplitude hidrológica no sistema (Figura 3.2-b), o que confirma a análise visual prévia realizada na Figura 2.2. Isto é, tanto os eventos extremos de seca quanto os de cheia estão se tornando mais severos desde os anos 1970 a uma taxa estimada em $+7,6$ cm/ano. Isso implica que a amplitude média do nível do rio Negro em Manaus, ou seja, a diferença entre a média das máximas e das mínimas cotas anuais, era de cerca de 8,6 m em 1970 e atualmente essa amplitude média é de 12,8 m, um aumento médio estimado de 4,2 m.

Este padrão é coerente com estudos recentes na Amazônia que associam essas mudanças à maior variabilidade climática e a alterações nos regimes de precipitação. Do ponto de vista operacional, essa ampliação da amplitude entre extremos implica em desafios para a gestão de recursos hídricos, afetando múltiplos setores. Portanto, a análise dos extremos demonstra uma mudança importante no regime do rio, com implicações críticas para o planejamento e a adaptação às mudanças ambientais em curso.

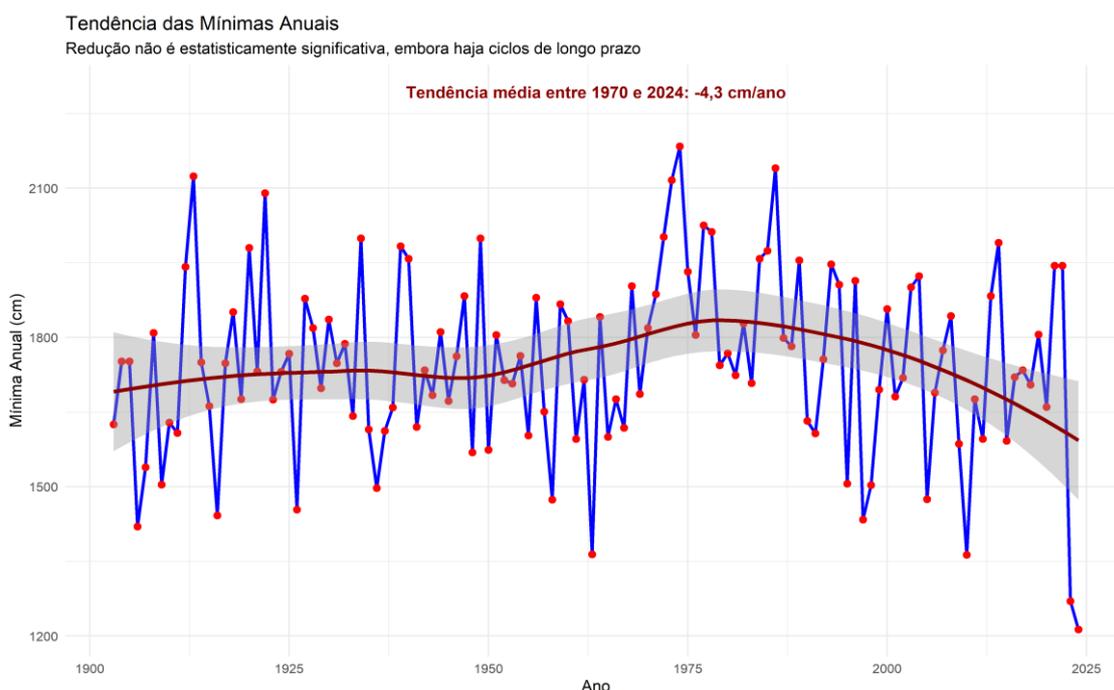


Figura 3.1: Tendência temporal das mínimas anuais na estação de Manaus. A linha de regressão linear (vermelha) indica uma taxa de declínio significativa de $-4,3$ cm/ano (p -value $< 0,05$) no período analisado, evidenciando uma redução progressiva das cotas mínimas ao longo das últimas décadas.

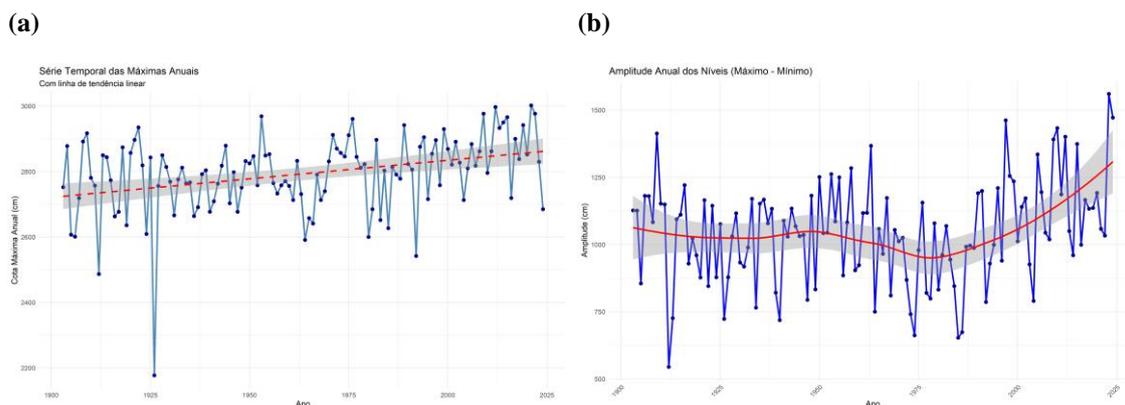


Figura 3.2: Tendência temporal das (a) máximas anuais e da (b) amplitude de variação anual na estação de Manaus. A linha de regressão linear (vermelha) indica uma significativa taxa de aumento tanto da máxima quanto da amplitude. No caso da tendência de aumento das máximas, ela aumentou a uma taxa de 1,1 cm/ano ao longo do período 1903-2025. A tendência da amplitude também é cíclica, a exemplo das mínimas, contudo depois de 1970 a taxa média de aumento foi de 7,6 cm/ano.

3.3 Ajuste da Distribuição Normal

A Figura 3.3 ilustra a distribuição de probabilidade dos dados mínimos anuais com curva de densidade de probabilidade ajustada aos dados. Existe uma proximidade entre média (linha azul), em 1748 cm, e mediana (linha verde), em 1746 cm, o que sugere uma pequena assimetria. O teste de Shapiro-Wilk, com p-value 0,78, sugere que os dados de mínimas podem ser bem descritos pela distribuição normal a um nível de significância de 5%. Assim, 90% dos dados das mínimas estão situados entre os limites de 1445 cm e 2047 cm, centrada em torno de 1748 cm. Ajustando essa distribuição aos dados de 2023 e 2024, essas secas teriam um período de recorrência superior a 100 anos.

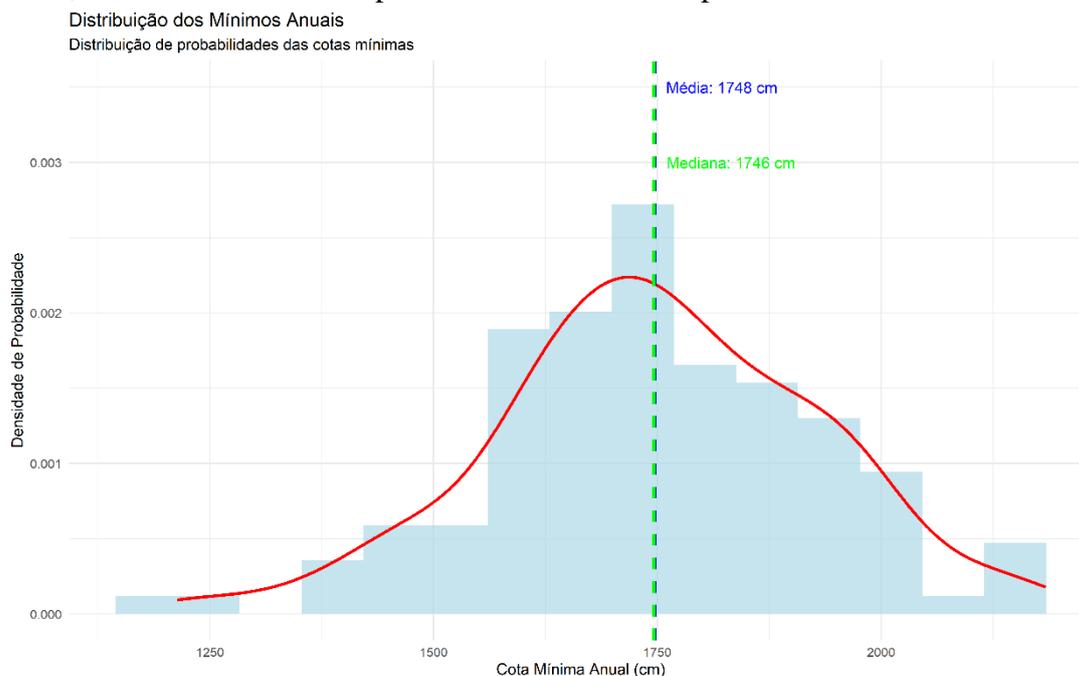


Figura 3.3: Ajuste da distribuição normal aos dados de mínimas anuais na estação Manaus

4 ANÁLISE DE DURAÇÃO DE EVENTOS

4.1 Análise de frequência

A Figura 4.1 apresenta o histograma da duração de dias abaixo de 20 m, que exibe um pico na duração em torno de 90 dias. Esse gráfico, porém, só inclui os anos em que os dados eram maiores que zero. Estima-se, com base nos dados de entrada, que em 11% dos anos o rio Negro em Manaus não atinge cotas inferiores a 20 metros. Essa modelagem, portanto, só é válida para os 89% dos anos em que o rio passa ao menos um dia abaixo dessa cota.

Para modelar probabilisticamente o fenômeno, foram ajustadas aos dados as distribuições Gamma, Exponencial e Weibull, que são mais adequadas para essa finalidade do que a normal. Com base no Critério de Informação de Akaike (AIC) e nos testes de Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling, a distribuição de Weibull demonstrou a melhor aderência aos dados, sendo a selecionada para representar a função densidade de probabilidade do fenômeno.

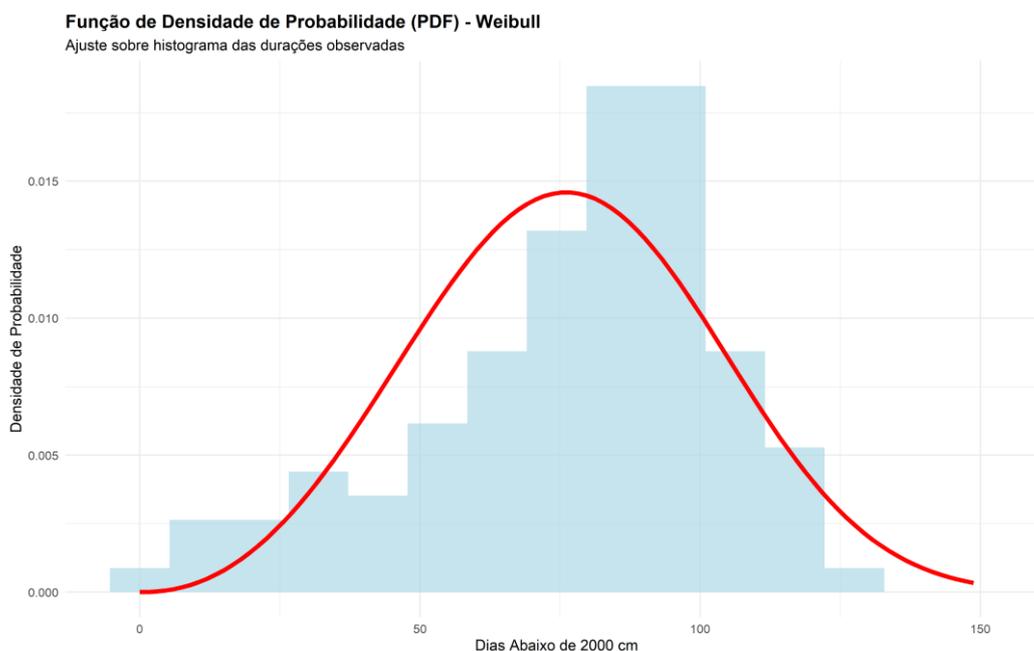


Figura 4.1: Ajuste da distribuição Weibull à duração de eventos de estiagem (dias abaixo de 20 m).

Com base nos dados selecionados para a análise de frequência de duração dos eventos de estiagem, foi construída uma curva de tempos de retorno de excedência, a qual indica o período de retorno de um evento de seca que ultrapassa uma determinada duração (em dias). Para melhor visualização dos eventos mais raros e extremos, optou-se pela aplicação de escala logarítmica no eixo das probabilidades (Figura 4.2).

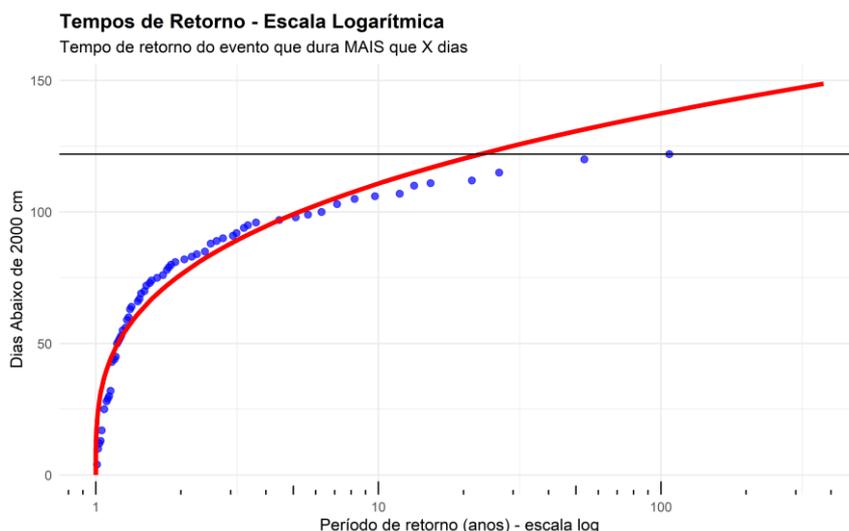


Figura 4.2: Probabilidade de excedência (período de retorno) para a duração de eventos de estiagem, derivada da distribuição de Weibull ajustada.

Considerando o ajuste realizado e ainda a estimativa de que em 11% dos anos o rio não atinja a cota de 20 metros, podem ser estimadas probabilidades e tempos de retorno efetivos para as durações de eventos de seca. A probabilidade efetiva estimada de um evento durar mais de 30 dias é de aproximadamente 85%, o qual possui tempo de retorno (TR) associado de aproximadamente 1,2 ano. Isso significa que é improvável que o rio passe por um ano aleatório sem que passe ao menos 30 dias abaixo da cota de 20 m. Já para 90 dias essa probabilidade é de aproximadamente 27%, o qual possui TR associado de 3,7 anos. Com 122 dias, que foi a duração do evento de 2024, a probabilidade de excedência é de aproximadamente 4%, que possui TR associado de 26 anos.

Apesar de a distribuição de Weibull ter sido aquela que apresentou melhor ajuste aos dados, é possível observar que para períodos de retorno maiores, o número de dias estimados pela distribuição é sistematicamente maior do que o número de dias observado empiricamente. Portanto, fica a ressalva de que para esses períodos de seca mais prolongados, os períodos de retorno podem estar sendo subestimados.

4.2 Correlação com mínimas anuais

A Figura 4.3 apresenta uma análise de correlação entre os níveis mínimos anuais e a duração de eventos de estiagem (dias abaixo da cota de 20 m). O coeficiente de correlação de $R=-0.79$ e o p-value estatisticamente significativo ($< 0,05$) confirmam uma forte correlação negativa. Isso demonstra que, em anos onde o nível mínimo atingido é mais baixo, a duração do período de estiagem é proporcionalmente maior. Essa relação é esperada (quanto mais baixo o nível do rio, mais tempo ele leva para se recuperar), mas nem sempre há essa correlação significativa, por isso que foi realizada a verificação. Essa relação é importante para qualificar a gestão dos recursos hídricos, uma vez que não só o mínimo é importante, mas também o tempo em que alguma restrição de uso pode ser observada.

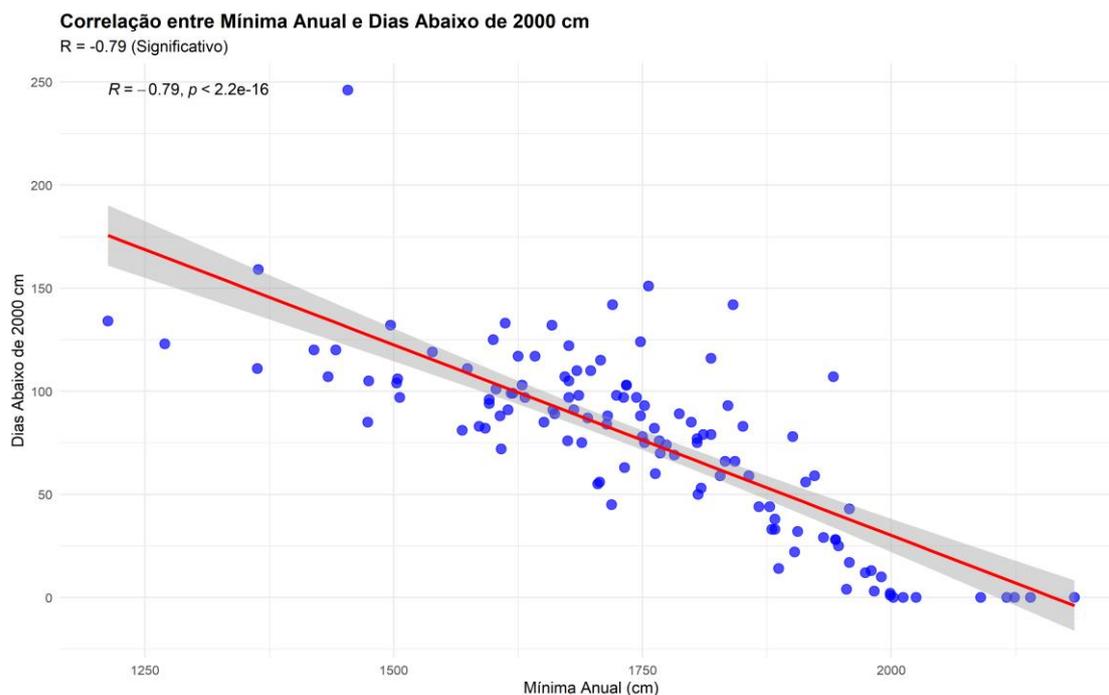


Figura 4.3: Análise de correlação entre os níveis mínimos anuais e o número de dias que o rio fica abaixo da cota de 20 m. A correlação significativa (p -valor $< 0,05$) indica que quanto mais baixo o nível que o rio atinge em um determinado ano, mais tempo ele permanece em níveis baixos.

5 PROGNÓSTICOS PARA 2025

5.1 Prognóstico por semelhança dos cotogramas

A Figura 5.1 apresenta a projeção de níveis do Rio Negro para o ano de 2025, a partir do nível atual de 2490 cm em 16/09/2025. A análise, baseada em cenários históricos, considera duas projeções distintas para a cota mínima, que deverá ser alcançada no início de novembro.

O primeiro cenário, representado pela linha azul, considera o comportamento de anos com tendências semelhantes à de 2025 e projeta uma cota mínima de 1895 cm. O segundo cenário, indicado pela linha roxa, baseia-se em anos que registraram as maiores descidas históricas e projeta uma cota mínima de 1730 cm. Em ambos os cenários as áreas sombreadas representam as incertezas das previsões, sendo a área rosada referente à incerteza associada ao cenário de maiores descidas e a área azulada referente à incerteza associada ao cenário de anos semelhantes ao atual; essas áreas representam a variação provável dos níveis em torno das projeções centrais.

Ressalte-se que, no cenário mais provável, o rio atinge a cota de aproximadamente 19 m. Caso esse cenário se confirme, caracterizaríamos uma seca pouco acima da normalidade (ver Figura 3.3). Por outro lado, em um cenário hipotético mais severo — com descidas pronunciadas a partir da presente data, anomalias aceleradas em setembro e outubro e um atraso no início da estação chuvosa —, o rio poderia se aproximar da cota de 1730 cm. Embora não existam projeções que sustentem essa hipótese, tornando-a pouco plausível, é importante notar que mesmo esse piso projetado se situaria dentro da normalidade, conforme a Figura 3.3.

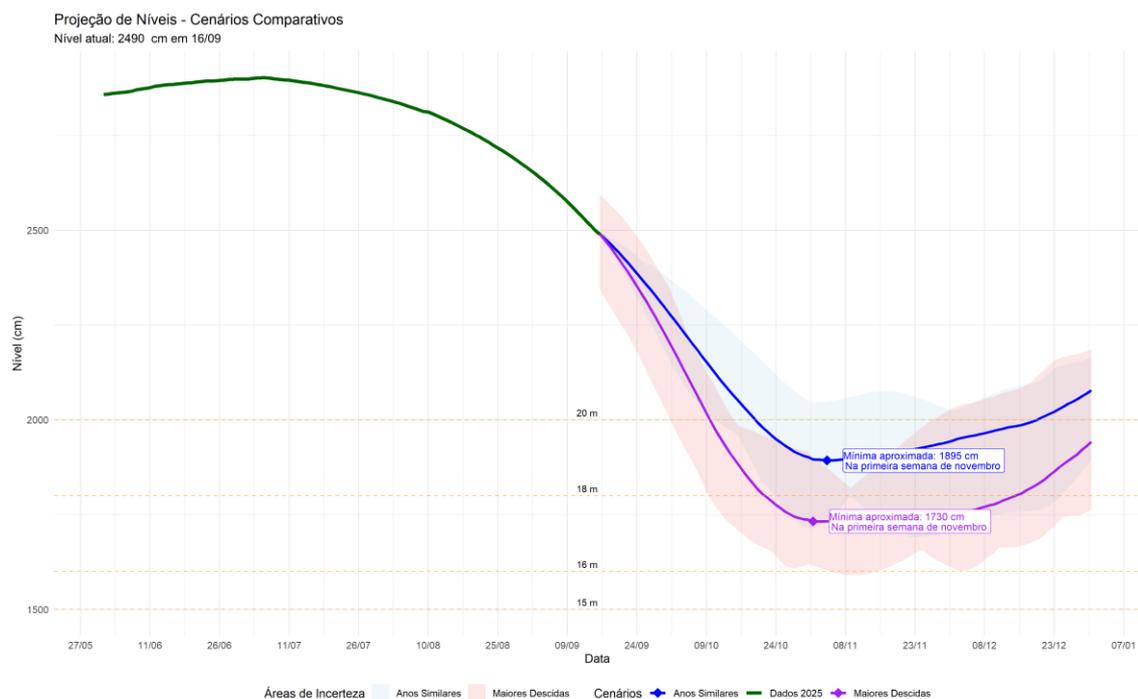


Figura 5.1: Projeção comparativa do nível d'água em Manaus a partir de 16/09/2025 - Simulação do comportamento futuro do nível (em cm) com base no patamar atual de 2490 cm. Apresenta a projeção derivada de anos históricos similares (Anos Similares) e o cenário de maiores descidas registradas (Maiores Descidas). As faixas sombreadas representam os envelopes de incerteza das projeções.

5.2 Prognóstico por Teleconexões Climáticas

Uma última avaliação nesta Nota Técnica é a análise de teleconexão climática, em especial, com o fenômeno El Niño. É de amplo conhecimento na região que anos de El Niño, como por exemplo, caracterizou os anos de 2023 e 2024 tendem a produzir secas na região amazônica. Por outro lado, uma La Niña, como por exemplo observada em 2021, tende a provocar cheias acima das normais. Para realizar essa análise, portanto, foram obtidos dados do índice ENSO3.4, utilizado para caracterizar os fenômenos El Niño e La Niña. Esses dados são apresentados na Figura 5.2.

A linha preta do gráfico da Figura 5.2 mostra a variação mensal do índice ENSO (El Niño-Oscilação Sul), que é a anomalia de temperatura da superfície do mar na região NINO 3.4 no Pacífico Central. Destacam-se, com bandas vermelhas, os eventos de El Niño e, com bandas azuis, os eventos de La Niña, identificados quando as anomalias persistem por pelo menos três meses consecutivos acima dos limiares de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. A alternância entre El Niño e La Niña introduz uma significativa variabilidade nos regimes hidrológicos e nos níveis dos rios da região. Considerando que o ENSO atualmente se encontra em fase neutra, as projeções sazonais de níveis que incorporam essa variável tendem a indicar condições próximas à média histórica, com menores desvios em relação à normalidade. Cabe destacar que as secas severas observadas em 2023 e 2024 ocorreram durante um evento forte de El Niño, classificado como o quinto mais intenso do histórico.

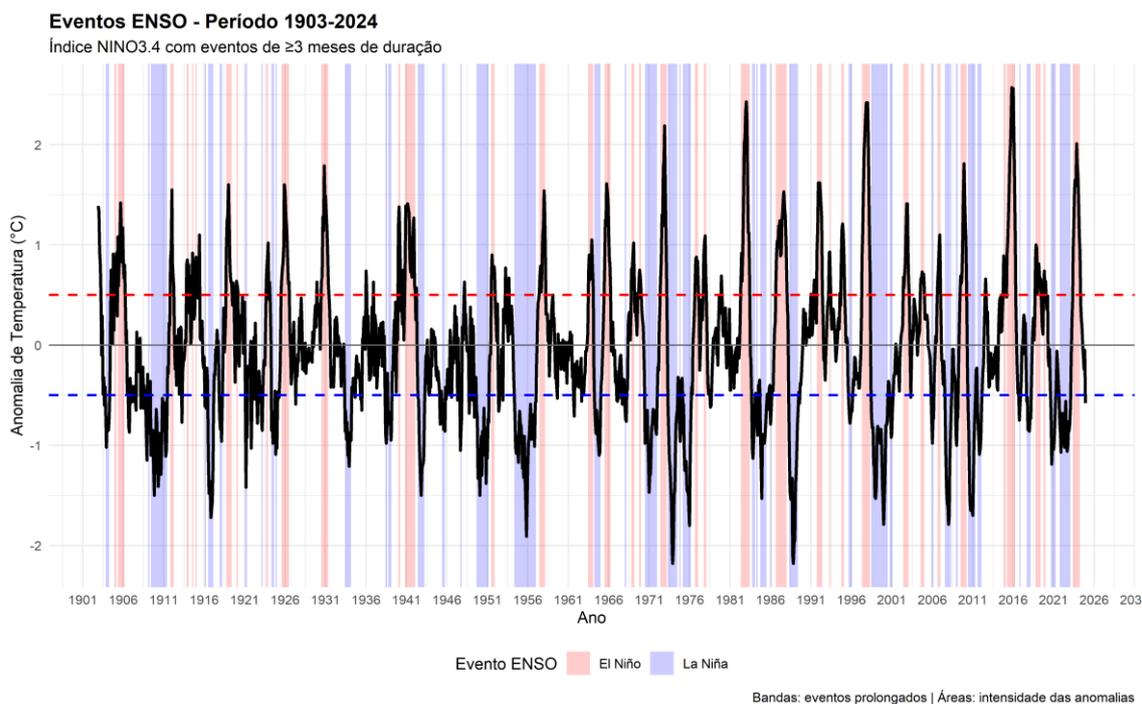


Figura 5.2: Evolução temporal do índice ENSO (El Niño-Oscilação Sul) no período 1903-2024. O gráfico apresenta a anomalia de temperatura da superfície do mar na região NINO3.4 do Pacífico Central. As bandas coloridas destacam os eventos de El Niño (vermelho) e La Niña (azul) que persistiram por pelo menos 3 meses consecutivos acima dos limiares de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. A linha preta contínua mostra a variação mensal do índice. Ressalte-se que o período atual apresenta uma situação de neutralidade.

Além do fenômeno El Niño, é comum avaliar também a série temporal da Oscilação Decadal do Pacífico (PDO). Ela indica a anomalia de temperatura do Oceano Pacífico Norte e entende-se que a PDO tem potencial para modular a intensidade dos eventos de ENSO: em anos de PDO aquecido, os efeitos de um potencial El Niño ficam exacerbados e em anos de PDO frio, os efeitos de um potencial evento de La Niña ficam mais intensos. A Figura 5.3 apresenta esses dados, e demonstra a alternância entre as fases positiva (PDO+), em bandas laranjas, e negativa (PDO-), em bandas roxas. Em escala decadal, essa oscilação exibe caráter persistente, permanecendo em uma mesma fase por longos períodos. Por exemplo, entre 2006 e o presente, verifica-se uma predominância de anomalias negativas, interrompida apenas entre 2014 e 2017. Atualmente, a PDO encontra-se em fase negativa, com temperaturas consistentemente inferiores à média.

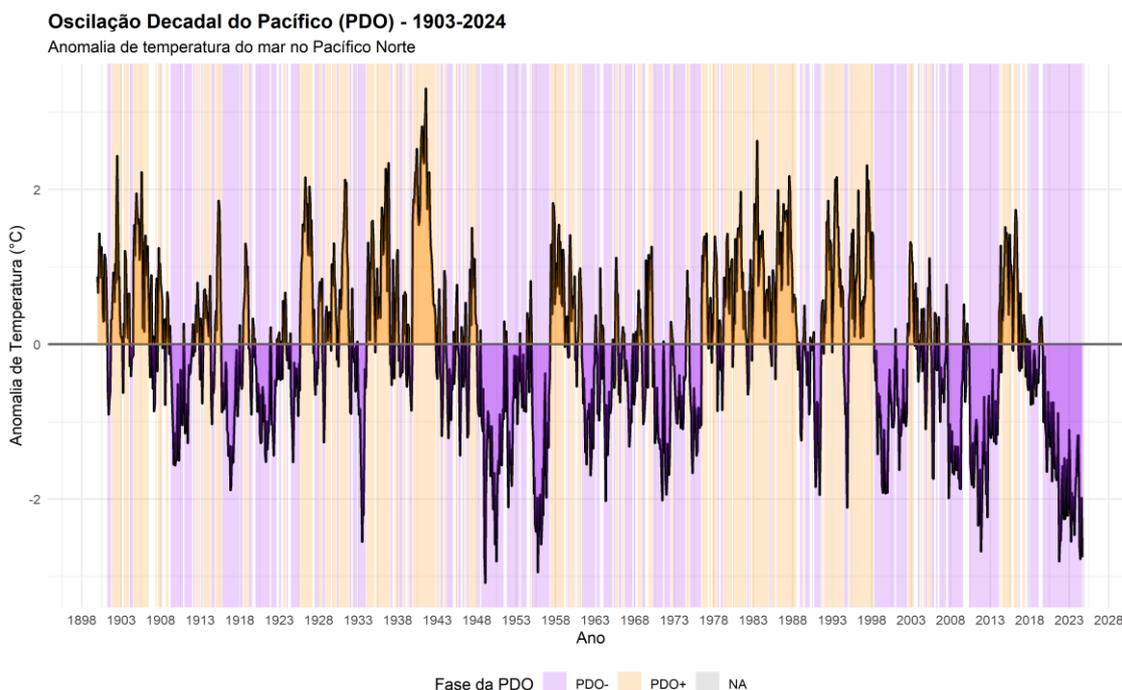


Figura 5.3: Série temporal da Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) no período 1903-2024. O gráfico mostra a anomalia de temperatura da superfície do mar no Pacífico Norte, representando as fases positiva (PDO+) e negativa (PDO-) da oscilação. As bandas laranja indicam fases quentes (PDO+), enquanto as bandas roxas representam fases frias (PDO-). Ressalte-se que o período atual apresenta uma situação de PDO negativo.

Para analisar a correlação entre os índices climáticos de dezembro do ano anterior e os níveis mínimos anuais do Rio Negro em Manaus no ano seguinte foi construída a Figura 5.4. O gráfico do Niño 3.4 (a) demonstra uma correlação negativa moderadamente significativa entre o índice Niño 3.4 e a cota mínima anual (com $R = -0,21$; $p\text{-value} = 0,02$). Essa relação sugere que as condições de El Niño em dezembro estão associadas a níveis mínimos mais baixos no ano subsequente. Essa correlação constata a condição normalmente colocada para a teleconexão da Amazônia com o El Niño, associado a secas mais severas, enquanto um cenário de La Niña associa-se a uma condição de cheias mais severas. Por outro lado, a análise com o índice da PDO (b) não apresentou uma correlação estatisticamente significativa ($R = 0,065$; $p\text{-value} = 0,48$), indicando que essa oscilação climática não é um bom preditor da vazante para o período avaliado na área de estudo.

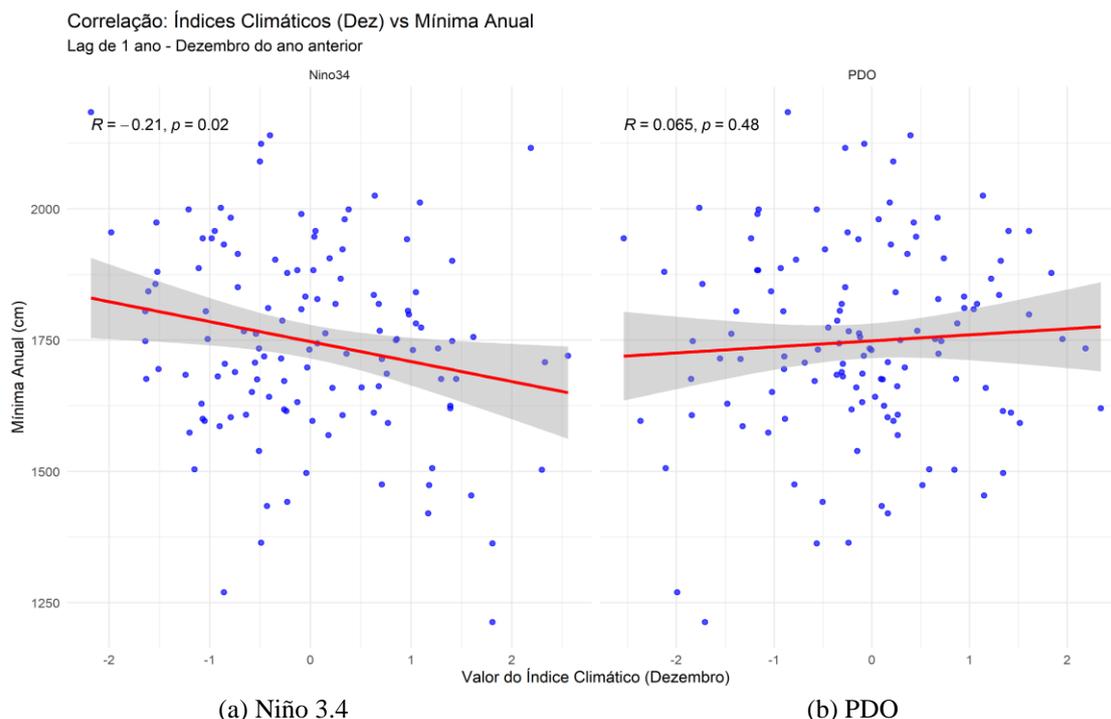


Figura 5.4: Correlação linear entre os índices climáticos do mês de dezembro do ano anterior e o nível mínimo anual observado na estação de Manaus. O índice Niño 3.4 (a) mostra uma correlação negativa moderadamente significativa ($R = -0,21$; $p = 0,02$) com a vazante do ano seguinte, enquanto a PDO (b) não apresentou uma correlação significativa ($R = 0,065$; $p = 0,48$) para o mesmo período.

Ao realizar a mesma análise, porém para a relação entre esses índices e a duração de eventos de estiagem (dias abaixo de 20 m) foi obtida a Figura 5.5. O gráfico da esquerda (Niño 3.4 – a) demonstra uma correlação positiva e significativa entre o índice Niño 3.4 e a duração da seca ($R=0,33$; $p\text{-value}=0,0002$). Essa relação sugere que as condições de El Niño no final de um ano estão associadas a períodos de seca mais longos e severos no ano subsequente. Em contraste, a análise com o índice da PDO não mostrou uma correlação estatisticamente significativa ($R=0,09$; $p\text{-value} = 0,32$), reforçando que esta oscilação climática de longo prazo não atua como um preditor confiável para a duração das vazantes na estação de Manaus.

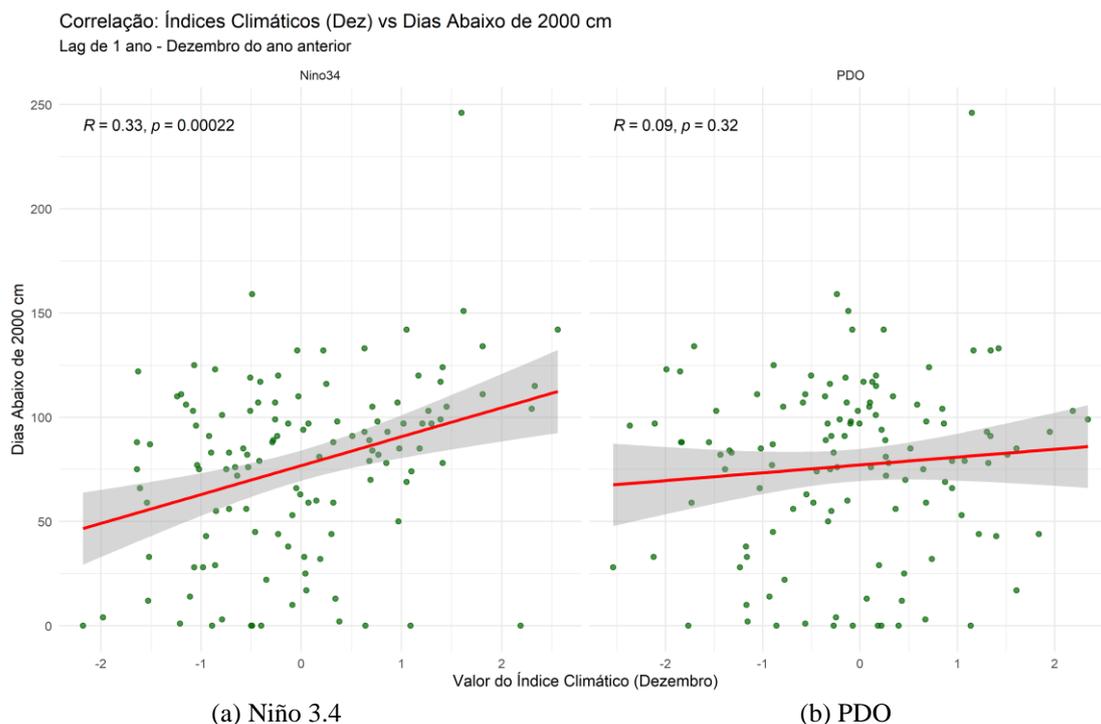


Figura 5.5: Correlação entre os índices climáticos de dezembro do ano anterior e a duração dos eventos de baixa vazão na estação de Manaus. Índice Niño 3.4 (a): correlação positiva significativa ($R = 0,33$; $p = 0,0002$); Índice PDO (b): sem correlação significativa ($R = 0,09$; $p = 0,32$).

6 COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS

A Tabela 6.1 consolida as projeções para a vazante de 2025 obtidas por dois métodos independentes: análise por semelhança de cotogramas e a previsão por teleconexões climáticas; com os valores dos respectivos intervalos de confiança entre parênteses.

Tabela 6.1: Síntese dos cenários futuros para a estação de Manaus em 2025

| Método | Mínima prevista (cm) | Dias abaixo de 20 (m) |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| Anos similares | 1895 (1690 - 2025) | 60 |
| Maiores descidas | 1730 (1590 - 1820) | 85 |
| Teleconexões climáticas | 1770 (1730 - 1805) | 68 (60 - 77) |

A análise comparativa revela convergência entre o cenário de Maiores Descidas, Anos Similares e o prognóstico baseado em teleconexões climáticas. Todos os métodos indicam uma vazante para 2025 cujos intervalos de confiança se interceptam. Ou seja, além da proximidade dos valores previstos, existe uma grande coerência estatística das previsões. Porém, o cenário de maiores descidas, diante dos prognósticos climatológicos que não sugerem fortes vazantes a partir de agora, como foram observadas em princípio em 2023 e 2024, parece ser um cenário improvável.

Sendo assim, as mínimas previstas para este ano provavelmente devem se situar entre os níveis de 1770 cm e 1890 cm. Ressalte-se que a comunidade de Manaus começa a sentir impactos mais severos para a navegação em torno da cota de 1600 cm e entra em alerta em torno da cota de 1700 cm. Ou seja, não se prevê impactos significativos a partir dos cenários traçados para a vazante de 2025.

Com relação aos dias abaixo da cota de referência de 20 metros, esse período deve se situar entre 60 e 85 dias abaixo da cota de referência de 20 m. Comparando-se com o ajuste apresentado na Figura 4.2, e com o ajuste de períodos de retorno efetivos, essa duração tem um período de recorrência baixo, em torno de 1,5 e 2,5 anos. Ou seja, é um evento bastante comum quando comparado com a referência histórica.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise da série histórica (1903-2024) confirma uma tendência estatisticamente significativa de agravamento das secas na estação de Manaus ao longo dos anos, com as mínimas anuais decaindo a uma taxa de -4,3 cm/ano. Além disso, foi identificada uma forte correlação negativa ($R = -0,79$) entre a cota mínima anual e a duração dos eventos de estiagem, demonstrando que anos com níveis mais baixos estão associados a períodos de seca mais longos.

Quanto aos fatores climáticos de influência, o fenômeno ENSO mostrou-se um preditor climático robusto para a hidrologia local. Condições de El Niño em dezembro correlacionam-se, de forma moderadamente significativa, com níveis mínimos mais baixos ($R = -0,21$; $p\text{-value} = 0,02$) e com estiagens mais longas, de forma significativa, ($R = 0,33$; $p\text{-value} = 0,00022$) no ano subsequente. Em contraste, a Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) não apresentou correlação significativa com os extremos hidrológicos.

Diante disso, o cenário mais provável para a vazante de 2025 aponta para uma seca de intensidade fraca, com níveis mínimos previstos entre 1770 cm e 1890 cm e um período de estiagem (abaixo da cota de referência de 20 m) entre 60 a 85 dias. Comparando-se com o histórico, o evento projetado para 2025 aproxima-se de um período de retorno de 1,5 e 2,5 anos. Ou seja, é um evento bastante comum quando comparado com a referência histórica. A neutralidade do ENSO no período anterior favorece a ocorrência de extremos fracos, tendendo a um comportamento mais próximo da média histórica.