



Dinâmica Pluviométrica e Logística Hidroviária de Exportação de Soja na Amazônia Brasileira (2003-2025): Sazonalidade, Tendência e Ciclos Climáticos

Dinâmica Pluviométrica e Logística Hidroviária de Exportação de Soja na Amazônia Brasileira (2003-2025): Sazonalidade, Tendência e Ciclos Climáticos

Mario Antonio Margarido¹

Daniel Kiyoyudi Komesu²

Frederico Araujo Tuolla³

Resumo: O Brasil se destaca como um dos maiores exportadores de commodities, com a soja representando uma fatia significativa de suas exportações. O transporte dessa produção, especialmente do Centro-Oeste e Matopiba, depende crescentemente dos portos do Arco Norte e do modal hidroviário, que oferece vantagens logísticas e ambientais. No entanto, a eficiência desse modal é fortemente influenciada pelos índices pluviométricos da Região Norte, que determinam os regimes de cheias e vazantes das hidrovias. Este estudo analisa os aspectos de curto prazo (sazonalidade) e de longo prazo (tendência e ciclo) dos índices pluviométricos na Região Norte do Brasil, bem como suas implicações para o planejamento da logística hidroviária. Para tanto, foram empregados o Método da Decomposição X13-ARIMA-SEATS para a análise sazonal, o Filtro Hodrick-Prescott para a tendência e o ciclo, e o Algoritmo Bry-Boschan para a datação dos ciclos. Os resultados revelam uma expressiva sazonabilidade nas exportações de soja, com picos em maio, e um regime hidrológico bem definido na Região Norte, com período de cheias entre novembro/dezembro e maio, e vazantes de junho a outubro. O Coeficiente de Amplitude Sazonal (CAS) dos índices pluviométricos foi de 75,59%, indicando alta variabilidade. Preocupantemente, a análise de longo prazo aponta para um decaimento dos índices pluviométricos médios anuais dessazonalizados, com uma queda de -38,05% entre 2003 e 2024 (equivalente a -1,91% a.a.), sugerindo possíveis impactos antropogênicos como o desmatamento. Os ciclos de escassez de chuva mostraram maior intensidade (amplitude) do que os períodos de chuva acima da média. Conclui-se que o conhecimento detalhado do regime pluviométrico é fundamental para a otimização das estratégias de transporte hidroviário, a redução de custos e a sustentabilidade do agronegócio, ao mesmo tempo em que os

¹ Dr. em Economia Aplicada. Senior Partner e Líder de Econometria da Pezco Economics e Pesquisador do PSP Hub Estudos em Infraestrutura e Urbanismo. Email: mario.margarido@pezco.com.br

²Especialista em Data Science e Analytics. Partner Data Science da Pezco Economics danielkomesu@pezco.com.br

³ Dr. em Economia de Empresas. Senior Partner da Pezco Economics e Presidente do PSP Hub Estudos em Infraestrutura e Urbanismo. Email: fredtuolla@pezco.com.br

resultados servem de alerta para a urgência de políticas públicas de mitigação dos efeitos da devastação florestal.

Palavras-chave: Logística hidroviária, Soja, Exportações, Índices pluviométricos, Região Norte do Brasil, Sazonalidade, Tendência, Ciclo.

Rainfall Dynamics and Waterway Logistics of Soybean Exports in the Brazilian Amazon (2003-2025): Seasonality, Trend and Climate Cycles

Abstract: Brazil stands out as one of the largest exporters of commodities, with soybeans representing a significant share of its exports. The transportation of this production, especially from the Midwest and Matopiba, increasingly depends on the ports of the Arco Norte and the waterway mode, which offers logistical and environmental advantages. However, the efficiency of this modal is strongly influenced by the rainfall indices of the North Region, which determine the flood and ebb regimes of the waterways. This study analyzes the short-term (seasonality) and long-term (trend and cycle) aspects of rainfall indices in the Northern Region of Brazil, as well as their implications for waterway logistics planning. For this purpose, the X13-ARIMA-SEATS Decomposition Method was used for seasonal analysis, the Hodrick-Prescott Filter for trend and cycle, and the Bry-Boschan Algorithm for cycle dating. The results reveal an expressive seasonality in soybean exports, with peaks in May, and a well-defined hydrological regime in the North Region, with a flood period between November/December and May, and ebb rates from June to October. The Seasonal Amplitude Coefficient (CAS) of the rainfall indices was 75.59%, indicating high variability. Worryingly, the long-term analysis points to a decay of the seasonally adjusted average annual rainfall indexes, with a drop of -38.05% between 2003 and 2024 (equivalent to -1.91% p.a.), suggesting possible anthropogenic impacts such as deforestation. The cycles of rainfall scarcity showed greater intensity (amplitude) than the periods of above-average rainfall. It is concluded that the detailed knowledge of the rainfall regime is fundamental for the optimization of waterway transport strategies, cost reduction and agribusiness sustainability, while the results serve as a warning for the urgency of public policies to mitigate the effects of forest devastation.

Keywords: Waterway logistics, Soybean, Exports, Rainfall indexes, Northern Region of Brazil, Seasonality, Trend, Cycle.

Introdução

O Brasil, país de dimensões continentais, tem sua inserção externa marcada pela forte especialização em *commodities*. No segmento energético, o petróleo lidera a pauta; entre os minerais, sobressai o minério de ferro; e, no agro, destacam-se o complexo soja⁴, o açúcar, a carne bovina, a celulose, o milho, o frango⁵, o café em grão e o suco de laranja concentrado, entre outros.

Dados do COMEXSTAT indicam que, em 2024, os principais itens exportados foram soja (grãos, farelo e óleo), minério de ferro, petróleo cru, açúcar, carne bovina, celulose, milho e frango (carne e cortes). O complexo soja atingiu US\$ 50,2 bilhões — equivalentes a 16,5% do total exportado — com variação de 12,3% frente a 2023.

A relevância do complexo soja para a economia brasileira recomenda mapear os fluxos desde a produção até a saída pelos portos. A produção é espacialmente dispersa: no Sul, o Rio Grande do Sul é referência; no Nordeste e no Norte, observa-se expansão recente — com ênfase para o MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia); e, no Centro-Oeste, concentra-se a maior parcela nacional, com destaque para o Mato Grosso.

Historicamente, as exportações de soja convergiam para os portos do Sudeste (Santos) e do Sul (Paranaguá), com predomínio do transporte rodoviário a partir do Centro-Oeste. No período recente, porém, intensificou-se o uso do chamado Arco Norte — conjunto de terminais a partir do paralelo 16°S, notadamente Itaqui (MA), Vila do Conde (PA), Itacoatiara (AM) e Santarém (PA). Essa rota estratégica tem reduzido custos logísticos e emissões, ao encurtar distâncias e ampliar o uso de modais mais eficientes para o escoamento de grãos (soja e milho) e a importação de fertilizantes. Estimativas correntes situam a participação do Arco Norte em torno de um terço das exportações brasileiras de soja em grão, com variações conforme o ano.

Do ponto de vista logístico, os portos do Arco Norte oferecem alternativa competitiva para o escoamento da produção do Centro-Oeste, Norte e Nordeste, reduzindo o percurso até os terminais do Sul/Sudeste e, por conseguinte, o custo de frete — com impactos positivos sobre a rentabilidade e a competitividade regional. Persistem, todavia, desafios relevantes: (i) gargalos de infraestrutura, em especial nas conexões ferroviárias e hidroviárias; e (ii) riscos climáticos, como secas severas e níveis hidrométricos baixos, que afetam a navegabilidade e a capacidade de transporte.

⁴ Os produtos que compõem o complexo soja são: soja em grão, farelo de soja e óleo de soja.

⁵ Abrange carne e cortes.

Considerando que, em média, o Arco Norte responde por fração expressiva ($\approx 1/3$) das exportações brasileiras de soja em grão — e que as hidrovias regionais são cruciais para esse escoamento — torna-se central compreender a sazonalidade, a tendência e os ciclos dos índices pluviométricos na Região Norte. Tal conhecimento subsidia o planejamento logístico hidroviário, permitindo otimizar janelas operacionais, reduzir custos e mitigar riscos de interrupção de fluxo.

À luz desse contexto, este estudo tem dois objetivos: (i) analisar os comportamentos de curto prazo dos índices pluviométricos na Região Norte — com ênfase em volume de chuvas e sua sazonalidade — e (ii) investigar seus componentes de longo prazo (tendência e ciclo). Complementarmente, discute-se a articulação entre esses padrões e a operação das hidrovias de carga na região, com foco nas implicações para a logística de exportação do complexo soja.

Material e métodos

Foram empregadas duas séries temporais mensais. A primeira corresponde aos índices pluviométricos da Região Norte, em milímetros, cobrindo o intervalo de janeiro de 2003 a maio de 2025, a partir do Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia — INMET/BDMEP (2025). O índice regional foi construído por média simples das estações ativas em cada mês. A segunda série refere-se às exportações de soja, em milhões de toneladas métricas, compreendendo o período de janeiro de 2012 a dezembro de 2024, com base no COMEXSTAT.

A caracterização dos aspectos de curto prazo, notadamente a sazonalidade, foi realizada por meio do procedimento X-13-ARIMA-SEATS aplicado à série pluviométrica mensal. O modelo ARIMA foi selecionado automaticamente pelo algoritmo, com detecção de outliers aditivos, de nível e de mudança transitória habilitada. A partir desse procedimento obtiveram-se os fatores sazonais mensais, a série dessazonalizada e os índices sazonais médios anuais.

Os componentes de longo prazo foram extraídos mediante o filtro de Hodrick-Prescott aplicado à série dessazonalizada. Utilizou-se parâmetro de suavização $\lambda = 129,600$, apropriado à frequência mensal, e conduziu-se análise de robustez com $\lambda = 14,400$, confirmando estabilidade qualitativa dos pontos de inflexão e da inclinação tendencial. Dessa etapa derivaram-se a tendência suavizada e o ciclo, definido como o desvio em relação à tendência.

A datação formal de picos e vales foi realizada com o algoritmo de Bry-Boschan aplicado à série dessazonalizada.

Para sintetizar a intensidade da sazonalidade, quando pertinente, calculou-se o Coeficiente de Amplitude Sazonal, definido por

$$\text{CAS} = \frac{\max_m S_m - \min_m S_m}{\bar{S}} \times 100$$

em que S_m denota os fatores sazonais mensais e \bar{S} a média anual.

As estimações foram conduzidas no ambiente R, utilizando-se o pacote *seasonal* para o X-13-ARIMA-SEATS, *mFilter* para o filtro HP e *BCDating* para o algoritmo de Bry-Boschan. As escolhas metodológicas seguem referências consolidadas para cada técnica, incluindo Margarido (2021) e Freitas, Ferreira e Barbosa (1998) para sazonalidade e aplicação do X-13, Hodrick e Prescott (1997) para extração de tendência e ciclo, Bry e Boschan (1971) para datação, e a discussão aplicada em Margarido, Shikida e Komesu (2025).

As hidrovias na região Norte: quadro geral

Apresentam-se, nesta seção, características das principais hidrovias da Região Norte com base em informações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). À luz da Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001, a Diretoria de Infraestrutura Aquaviária (DAQ) é incumbida da administração e gestão de programas de construção, operação, manutenção e restauração da infraestrutura aquaviária, compreendendo a gestão, ampliação, modernização e fiscalização de hidrovias, instalações portuárias públicas de pequeno porte (IP4) e eclusas, além de intervenções estruturantes em portos organizados.

Hidrovia do Amazonas

A Hidrovia do Amazonas (HN-100 Rio Amazonas) constitui a principal via de transporte e escoamento de cargas da Região Norte, respondendo por parcela estimada em cerca de 65% do total movimentado. Desempenha papel central no comércio interno e externo, contribuindo para a oferta de produtos a preços competitivos. Sua extensão navegável alcança 1.646 km no trecho Belém (PA)–Manaus (AM). A HN-100 integra uma malha que envolve, entre outros, os rios Jatapu, Madeira (HN-117), Negro (HN-129), Paru (HN-105), Tapajós (HN-106), Trombetas (HN-111) e Xingu (HN-103), e tem continuidade no Solimões (HN-132), principal formador do Amazonas. Conexões com a

HN-117 Rio Madeira e com a Hidrovia do Tocantins-Araguaia ampliam sua capilaridade logística.

A bacia amazônica, na qual se insere a hidrovia, é a maior do mundo, com aproximadamente 7 milhões de km² de drenagem, dos quais cerca de 55% situam-se em território brasileiro, abrangendo Acre, Amazonas, Amapá, Mato Grosso, Pará, Roraima e Rondônia. A via atravessa 29 municípios nos estados do Amazonas, Amapá e Pará. A navegabilidade é favorecida pela profundidade da calha e pela ausência de corredeiras na planície amazônica. Em Óbidos (PA), a profundidade atinge a ordem de 30 m; ao longo do curso, verifica-se variação sazonal da lâmina d'água, compatível com a alternância entre períodos de cheias e vazantes. A largura útil oscila entre aproximadamente 440 m e 9.900 m, com média próxima de 2.000 m, permitindo a operação de comboios de grande porte (até cerca de 18 mil toneladas) inclusive em estiagem. A infraestrutura existente combina trechos em corrente livre e segmentos canalizados, sustentada por mais de 70 terminais e portos distribuídos ao longo da hidrovia.

O regime hidrológico apresenta sazonalidade bem definida. Em termos médios, a enchente (água altas) ocorre entre fevereiro e junho, e a vazante (água baixas) entre julho e outubro, admitindo-se variações locais e interanuais; sínteses do DNIT registram, adicionalmente, o início das águas altas em novembro e o das águas baixas em junho em certos trechos. Em Óbidos, a vazão média situa-se em torno de 170.000 m³/s.

Quanto ao perfil operacional, predomina a navegação de cabotagem, seguida pelo longo curso e pela navegação interior. A hidrovia é utilizada por embarcações de perfis diversos — desde embarcações ribeirinhas e de turismo até balsas de carga, petroleiros, navios mercantes e graneleiros. A movimentação anual de cargas tem se situado em torno de 50 milhões de toneladas, incluindo produtos regionais (borracha, castanha-do-pará, madeiras de lei, peles), derivados de petróleo, produtos agrícolas e grãos, minérios, celulose, bauxita e cauim; entre as principais classes de carga figuram semirreboques “baú”, combustíveis e óleos minerais, soja e milho.

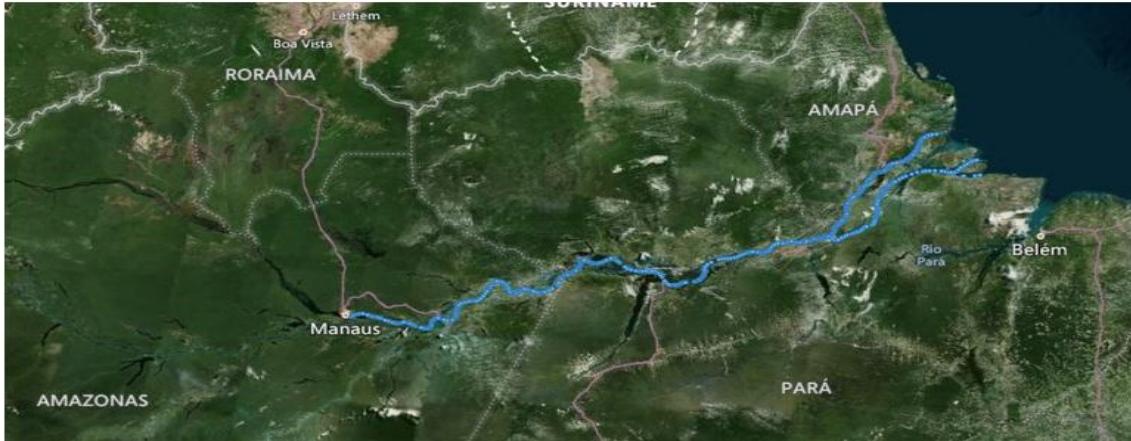


Figura 1. Hidrovia do Amazonas.

Fonte: DNIT, 2021a.

Hidrovia do Madeira

A Hidrovia do Madeira (HN-117 Rio Madeira) constitui um dos eixos estratégicos do Corredor Logístico Norte, ocupando a segunda posição em relevância na Região Norte, atrás apenas da HN-100 Rio Amazonas, da qual é importante afluente pela margem direita. Desempenha papel central no escoamento de grãos — em especial soja, milho e açúcar — provenientes do Mato Grosso, que alcançam Porto Velho (RO) após aproximadamente 800 km pela BR-364. Além do fluxo de cargas, registra movimento de passageiros e integra-se aos principais centros do Centro-Oeste por sua articulação intermodal. No perfil de cargas (dados de 2015), destacam-se soja, milho e combustíveis, óleos minerais e derivados. A conexão com a HN-100 amplia a capilaridade logística regional.

A via navegável estende-se por cerca de 1.060 km entre Porto Velho (RO) e a foz em Itacoatiara (AM), dos quais aproximadamente 180 km situam-se em Rondônia e 876 km no Amazonas, atravessando 11 municípios (oito amazonenses e três rondonienses). O rio é formado pela confluência dos rios Mamoré (nascente na Serra de Cochabamba, Bolívia; HN-125) e Guaporé (HN-126) e segue em direção nordeste, vencendo sucessivas corredeiras até Porto Velho, ponto a partir do qual se inicia o trecho hidroviário. A navegabilidade é perene e ocorre em regime de corrente livre, sem barragens no percurso operacional, com possibilidade de comboios de grande porte atingirem capacidades próximas a 18 mil toneladas mesmo em estiagem. A largura varia de aproximadamente 440 m a 10.000 m, com média próxima de 1.000 m, e a

declividade é baixa (cerca de 1,7 cm/km). A profundidade apresenta forte sazonalidade: pode alcançar a ordem de 13 m, chegando a cerca de 18 m nas cheias em virtude da influência do Amazonas, ao passo que, na vazante, emergem obstáculos naturais como bancos de areia, pedrais e trechos com corredeiras, elevando tempos de viagem e riscos operacionais.

O ciclo hidrológico é bem demarcado, com enchentes (água altas) predominantemente entre fevereiro e maio e vazante (água baixa) entre julho e outubro/novembro, admitindo variações interanuais. A vazão média situa-se em torno de 22.000 m³/s. Esse regime condiciona a formação de comboios, os calados operacionais e a programação logística ao longo do ano, fatores que são determinantes para a eficiência e a segurança do transporte fluvial na HN-117.

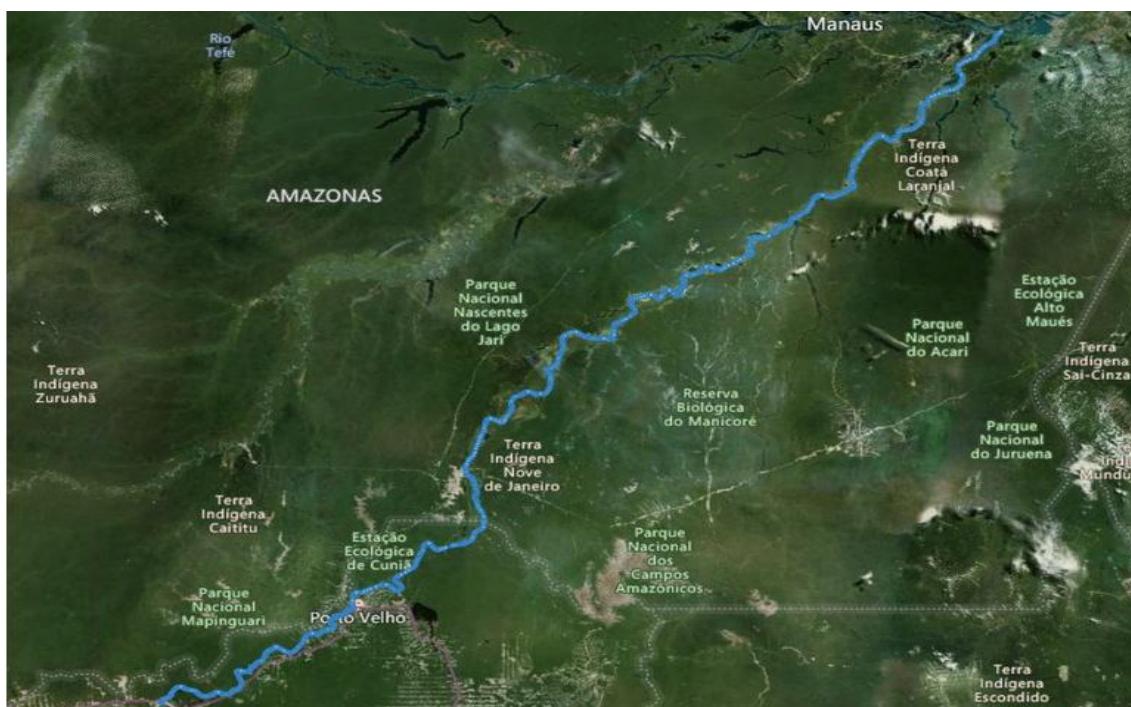


Figura 2. Hidrovia do Madeira.

Fonte: Dnit, 2021b.

Hidrovia do Solimões

A Hidrovia do Solimões (HN-132 Rio Solimões) figura entre as principais vias de transporte e escoamento de cargas da Região Norte. Por constituir o principal formador do Rio Amazonas, é usualmente tratada como continuidade a montante da HN-100. Sua

extensão navegável alcança cerca de 1.630 km no sentido oeste–leste, desde a fronteira brasileira até o município de Manaus (AM), atravessando área que envolve 87 municípios nos estados do Acre, Amazonas, Rondônia e Roraima e abrangendo as bacias dos rios Içá, Japurá, Juruá, Jutaí, Purus e Negro. A largura média é da ordem de 1.210 m e a vazão média, nas proximidades da confluência com o Rio Negro (HN-129), situa-se em torno de 100.000 m³/s.

A hidrovia é vital para a competitividade do comércio regional, atendendo simultaneamente ao transporte de passageiros, a cargas fracionadas e a granéis, apoiada por infraestrutura que combina trechos em corrente livre e segmentos canalizados. A dinâmica morfológica do leito, entretanto, impõe desafios operacionais recorrentes: mudanças de canal entre safras hidrológicas, migração de bancos de areia e de ilhas, erosão de margens e, em estiagem, exposição de pedrais e formação de praias; em cheias, troncos e galhadas tendem a concentrar-se no talvegue, aumentando o risco de colisões. Condições atmosféricas locais — como fumaça de queimadas, chuvas intensas e nevoeiros matinais — podem reduzir a visibilidade. Em razão desses fatores, são recomendáveis procedimentos de fundeio e progressão em luz diurna em trechos sensíveis entre Manaus e Tabatinga. Embora não haja, em termos gerais, restrições formais à navegação, navios mercantes que demandam até Iquitos (Peru) devem operar com prático a bordo.

O regime hidrológico apresenta sazonalidade definida, com enchente (água altas) predominantemente entre fevereiro e julho — havendo sínteses que indicam fevereiro a junho — e vazante (água baixas) entre julho e outubro, com variabilidade interanual e espacial ao longo do curso.



Figura 3. Hidrovia do Solimões.

Fonte: DNIT, 2021c.

Hidrovia do Tapajós-Teles Pires

A Hidrovia do Tapajós-Teles Pires (HN-106 Rio Tapajós e HN-110 Rio Teles Pires) ocupa posição estratégica na articulação entre os polos de produção agrícola do Centro-Oeste e a HN-100 Rio Amazonas, viabilizando o acesso ao Oceano Atlântico. Inserida no Corredor Logístico Norte — Eixo Tapajós, a via desempenha papel relevante no escoamento de grãos e insumos do Norte e Centro-Leste de Mato Grosso e do Sudoeste do Pará, ao mesmo tempo em que oferece rotas alternativas ao Centro-Sul, descongestionando outros modais e infraestrutura portuária. O acesso terrestre ocorre, predominantemente, pelas BR-230 (Transamazônica) e BR-163 (Cuiabá–Santarém). No perfil de cargas, sobressaem madeira, soja e farelo, demais grãos, gêneros alimentícios e produtos inflamáveis.

A extensão hidrográfica do Tapajós até a confluência com os rios Teles Pires (HN-110) e Juruena (HN-107) alcança cerca de 843 km, enquanto o trecho do Teles Pires perfaz aproximadamente 1.000 km; a métrica oficial navegável soma 359 km. A foz do Tapajós em Santarém (PA) situa-se a cerca de 950 km de Belém (PA) e 750 km de Manaus (AM). A área de influência abrange 96 municípios nos estados do Amazonas, Rondônia, Pará e Mato Grosso, sendo o Teles Pires divisor natural entre Mato Grosso e Pará por cerca de 330 km. A largura média do curso principal é da ordem de 10 km, com variação espacial significativa.

A navegabilidade distribui-se em três trechos com características distintas, em razão de obstáculos naturais. Entre Santarém e Itaituba (Baixo Tapajós) observa-se navegação francamente perene ao longo do ano, com profundidade mínima em torno de 2,5 m, declividade média próxima de 4 cm/km e presença de numerosas ilhas fluviais. No segmento intermediário, marcado pelas corredeiras de São Luís do Tapajós e de Chacorão, com cerca de 420 km de extensão, a declividade média eleva-se para aproximadamente 15 cm/km, multiplicam-se afloramentos rochosos, saltos e bancos de areia, e a profundidade mínima pode cair para cerca de 1,5 m, tornando o trecho intransponível para embarcações de maior porte em condições ordinárias. Do conjunto de corredeiras de Chacorão até a confluência Juruena–Teles Pires, ao longo de aproximadamente 80 km, repetem-se restrições semelhantes, com pedrais, ilhas e bancos de areia que limitam severamente a operação.

Do ponto de vista hidrossedimentológico, o Tapajós apresenta baixa taxa de transporte de sedimentos, águas relativamente claras e menor formação de bancos móveis, com vazão média próxima de 9.000 m³/s; já o Teles Pires possui fundo predominantemente arenoso e vazão média na proximidade da foz em torno de 3.700 m³/s. Em períodos de estiagem, são frequentes o afloramento de bancos de areia e a redução de calado, com implicações diretas para a programação logística.

Os parâmetros de projeto indicam operação típica com comboios de até 200 m de comprimento e 24 m de boca, calado mínimo de 1,50 m — podendo alcançar aproximadamente 2,50 m nas águas altas — e capacidade de cerca de 7.500 toneladas por comboio. Tais condicionantes reforçam a vocação da hidrovia para o escoamento de cargas a granel, ao mesmo tempo em que evidenciam a necessidade de planejamento operacional ajustado à sazonalidade e às restrições morfológicas dos trechos superiores.

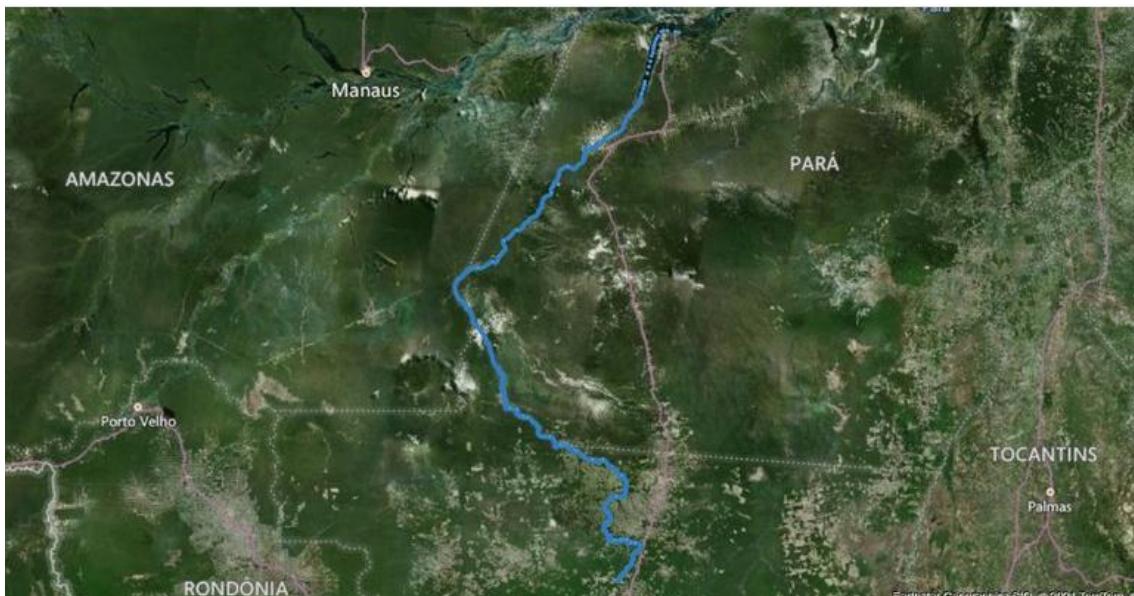


Figura 4. Hidrovia do Tapajós-Teles Pires

Fonte: DNIT, 2021d.

Hidrovia do Tocantins-Araguaia

A Hidrovia do Tocantins-Araguaia constitui um dos principais eixos do corredor Centro-Norte, com relevância estratégica nacional por atravessar o bioma Cerrado, maior fronteira produtora de grãos do país. Inserida no Corredor Centro-Norte, conecta-se à HN-100 Rio Amazonas e alcança o porto de Vila do Conde (PA), posição geográfica favorável ao acesso aos mercados da América do Norte, Europa e Oriente Médio. A hidrovia integra a segunda maior bacia hidrográfica do Brasil — composta pelas bacias do Araguaia, Marajó, Pará e Tocantins — com área de drenagem de aproximadamente 918.243 km², abrangendo porções dos estados do Pará, Mato Grosso, Tocantins, Maranhão e Goiás, além de segmento ao norte do Distrito Federal, somando cerca de 300 municípios.

Do ponto de vista físico-operacional, apresenta potencial navegável próximo de 3.000 km, com extensão navegável consolidada estimada em cerca de 1.960 km e largura média em torno de 500 m. A via é formada preponderantemente pela HN-200 Rio Tocantins e pela HN-209 Rio Araguaia. O Rio Tocantins nasce nas proximidades do Distrito Federal, no Planalto de Goiás (cota aproximada de 1.110 m), corre cerca de 2.400 km em direção sul-norte até a foz próxima à Ilha do Marajó e possui navegação comercial concentrada, em geral, nos trechos Miracema do Tocantins (TO)–Estreito (MA) e Marabá (PA)–Belém (PA). Em cheias, admite-se navegação prolongada, alcançando aproximadamente 2.000 km entre Belém (PA) e Lajeado (TO). O principal afluente, o Rio Araguaia, nasce na Serra do Caiapó (GO), percorre cerca de 2.115 km rumo ao norte até desaguar no Tocantins e funciona como limite natural entre Goiás, Mato Grosso, Tocantins e Pará. Nesse setor, o curso se divide em Araguaia e Javaés, delimitando a Ilha do Bananal (TO), maior ilha fluvial do mundo, com cerca de 20.000 km².

A infraestrutura aquaviária compreende vias navegáveis, terminais hidroviários e estruturas de transposição de nível. Destacam-se as duas eclusas de Tucuruí (210 m de comprimento, 33 m de largura e profundidade mínima de 3,5 m), empregadas no percurso Belém (PA)–Lajeado (TO). Na estiagem, a navegabilidade a montante do lago de Tucuruí é condicionada pelo Pedral do Lourenço, trecho de aproximadamente 43 km de afloramentos rochosos que restringe a passagem de comboios de maior porte entre o final do reservatório e Marabá (PA). Adicionalmente, o setor inferior do Araguaia,

entre Conceição do Araguaia (PA) e a confluência com o Tocantins, enfrenta limitações associadas a corredeiras de maior energia.

Os parâmetros de projeto usualmente considerados indicam comboios de até 108 m de comprimento, 16 m de boca e calado de 1,5 m ao longo da hidrovia; no setor do Pedral do Lourenço, podem ser requeridas configurações de 150 m de comprimento, 32 m de boca e calado mínimo de 2,1 m. A matriz de cargas inclui semirreboques tipo “baú”, combustíveis e óleos minerais, soja e milho, refletindo o potencial da hidrovia para o escoamento da produção de Mato Grosso, Goiás, Pará e Tocantins. O regime hidrológico exibe sazonalidade definida, com águas altas entre janeiro e maio e águas baixas de junho a dezembro, o que demanda planejamento operacional atento às janelas de calado e aos condicionantes morfológicos dos trechos críticos.

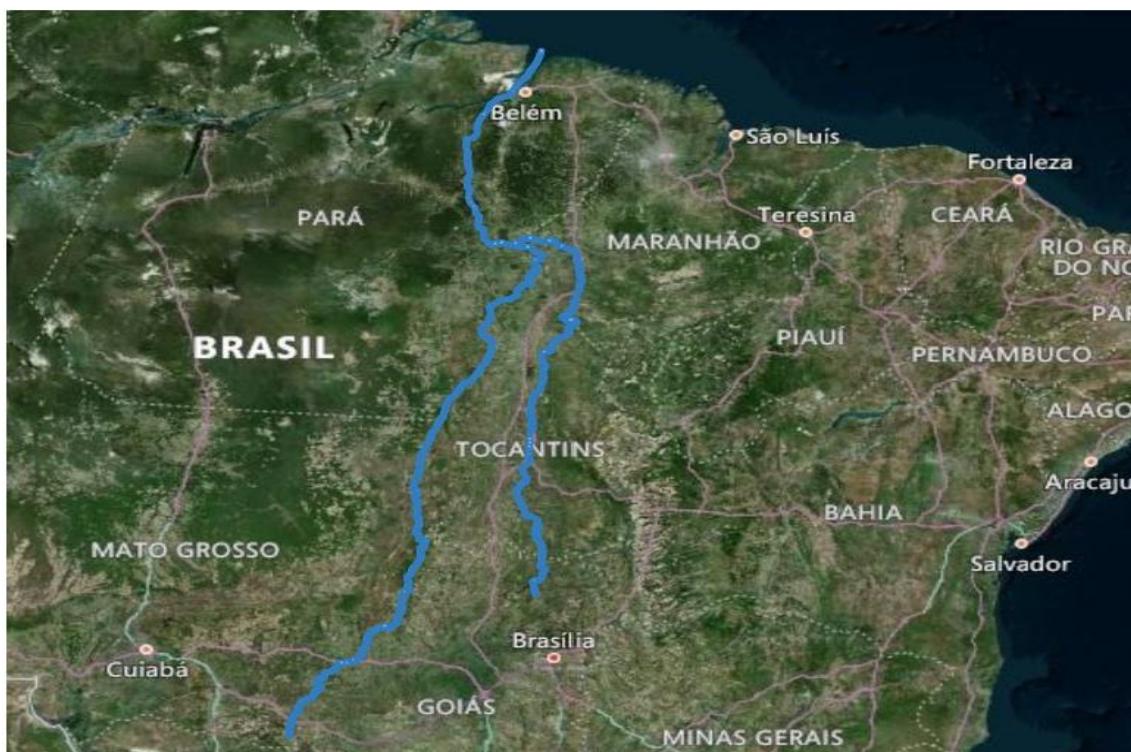


Figura 5. Hidrovia do Tocantins-Araguaia

Fonte: Dnit, 2021e.

Os caminhos da soja no Brasil até o mercado internacional

O Brasil ocupa posição de destaque no mercado internacional de *commodities*. O principal desafio logístico reside no escoamento dessas mercadorias do interior até os portos de exportação, de onde seguem para seus destinos no exterior.

A produção de soja distribui-se pelas Regiões Sul, Sudeste, Nordeste e Norte — com ênfase para o MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) — e concentra-se sobretudo no Centro-Oeste. Destaca-se, em particular, o Estado de Mato Grosso. De acordo com informações da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2025), em 2024 Mato Grosso respondeu por 36,8% da área plantada de soja no país e por 42,7% da produção nacional. No que se refere à produtividade, avaliou-se a razão entre o rendimento de Mato Grosso e o rendimento médio do Brasil no período 1976/77–2024/25; a média dessa razão foi 112, indicando produtividade 11,2% superior à média nacional.

As trajetórias de expansão foram estimadas por meio de regressões lineares simples no tempo, conforme a abordagem clássica apresentada em Ramanathan (1998). Os resultados (Figura 6) mostram que a área plantada de Mato Grosso cresceu a uma taxa média anual de 10,94% a.a., frente a 3,32% a.a. para o Brasil. Em termos de produção, a taxa média anual foi de 12,93% a.a. em Mato Grosso e 5,30% a.a. para o conjunto do

país no intervalo 1976/77-2024/25, reforçando o protagonismo estadual na soja. No plano logístico doméstico, prevalece o modal rodoviário em todas as regiões brasileiras.

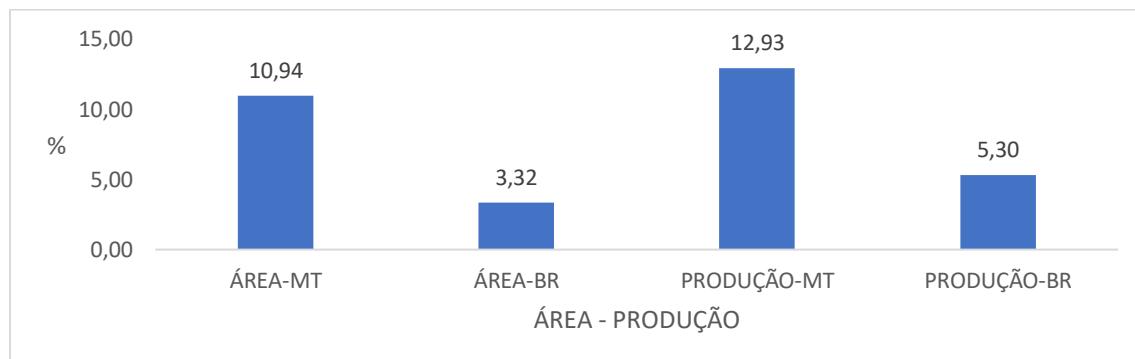


Figura 6. Taxas Médias Anuais de Crescimento, Área e Produção de Soja, Mato Grosso e Brasil, 1976/77 – 2024/25.

Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados básicos da Conab.

Na Região Norte, dados do primeiro trimestre de 2025 do *Brazil Soybean Transportation* (USDA, 2025a) indicam participação de 22% da soja exportada pelo país (Figura 7). Nessa macrorrota operam os modais rodoviário e hidroviário. A soja proveniente do norte de Mato Grosso é transportada por caminhão até o terminal fluvial de Porto Velho (RO), onde ocorre o transbordo para barcaças que seguem pelo rio Madeira até Santarém — cidade situada na margem direita do rio Tapajós, a aproximadamente 3 km da confluência com o rio Amazonas. Alternativamente, a carga segue por rodovia até Miritituba (Itaituba, PA), no rio Tapajós, para transbordo em barcaças com destino a Santarém e/ou Barcarena, de onde a mercadoria é enviada ao exterior.

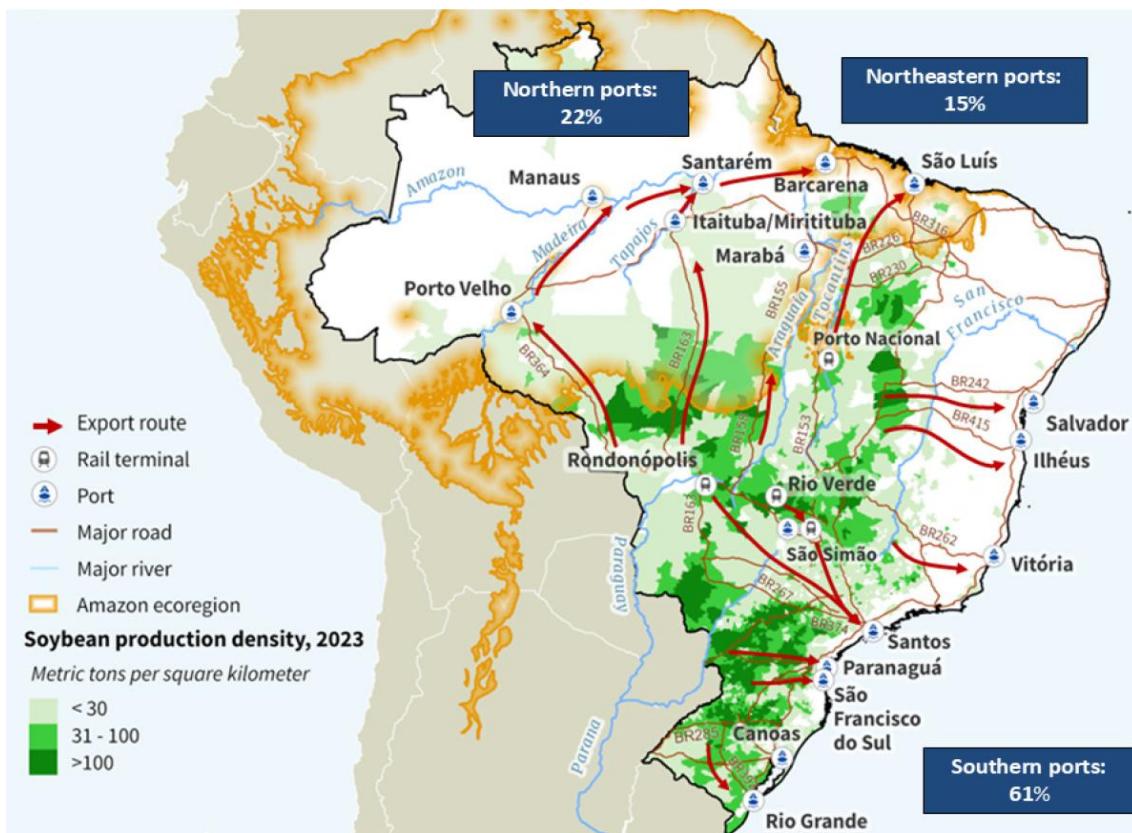


Figura 7. Densidade de Produção de Soja, Trajetos para Exportação de Soja, Portos Utilizados e Percentual Exportado por Região, Brasil, Primeiro Trimestre, 2025.

Fonte: Brazil Soybean Transportation (USDA, 2025a).

Considerando que a China é o principal destino da soja brasileira, examinam-se os custos logísticos para o escoamento pelo Arco Norte até Xangai. Não há, nesse caso, alternativa ferroviária; a origem no norte de Mato Grosso pode optar por (i) apenas transporte rodoviário até Santarém ou (ii) combinação rodoviária e hidroviária até Barcarena.

No primeiro arranjo, a distância rodoviária entre o norte de Mato Grosso e Santarém é de 876 milhas (USDA, 2025a). O frete rodoviário é de US\$ 54,63 por tonelada métrica, ao qual se soma o frete marítimo de Santarém a Xangai de US\$ 39,00 por tonelada métrica, resultando em custo de transporte de US\$ 93,63 por tonelada métrica. Acrescido o preço de referência na propriedade rural (US\$ 317,36 por tonelada métrica), o custo total até Xangai é de US\$ 410,99 por tonelada métrica, valor inferior ao custo total de rotas que escoam via Santos, seja exclusivamente por rodovia, seja por combinação rodoviária-ferroviária (Figuras 8 e 9).

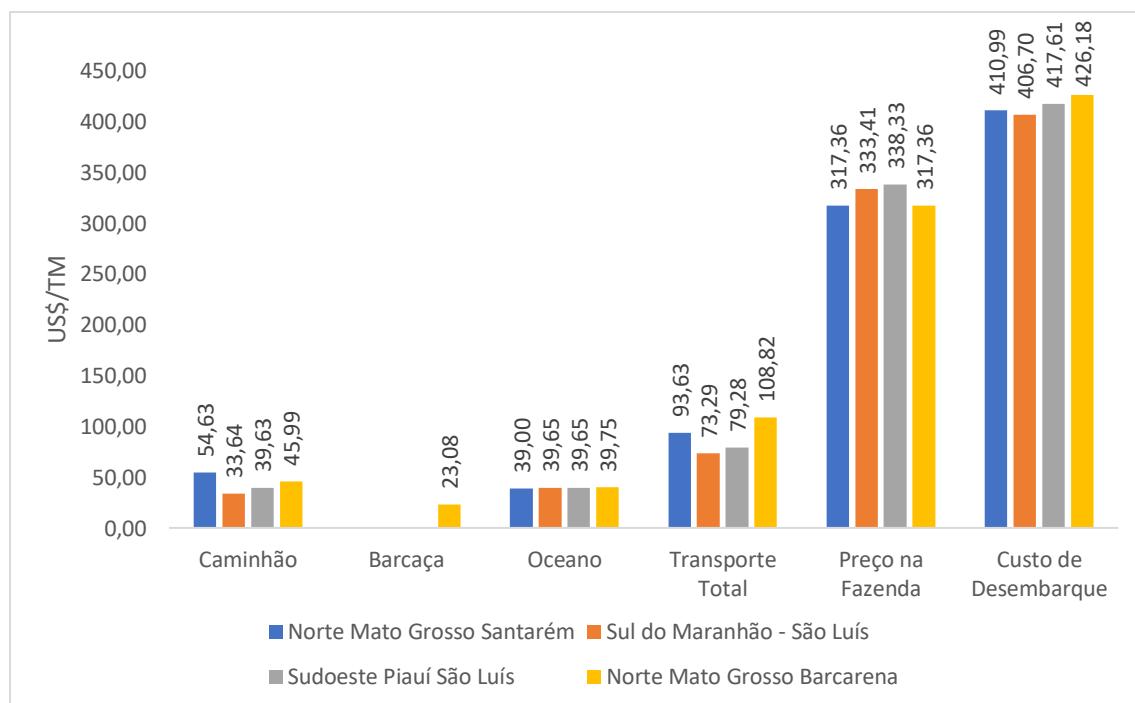


Figura 8. Custos da Soja na Fazenda, por Modal de Transporte e Custo Total, em US\$ por Tonelada Métrica, Região Norte de Mato Grosso até Santarém e Barcarena, Sul do Maranhão até São Luís e Sudoeste do Piauí até São Luís, Destino Final Xangai (China), Primeiro Trimestre de 2025.

Fonte: *Brazil Soybean Transportation* (USDA, 2025a).

No segundo arranjo, a soja segue por rodovia até Miritituba/Itaituba, com custo de US\$ 45,99 por tonelada métrica, e, em seguida, por via hidroviária até Barcarena, com custo de US\$ 23,08 por tonelada métrica. O total de transporte interno atinge US\$ 69,07 por tonelada métrica. Adicionando o preço de referência na propriedade rural e o frete marítimo de US\$ 39,75 por tonelada métrica, o custo total até Xangai soma US\$ 426,18 por tonelada métrica (Figura 8). Em comparação com o arranjo exclusivamente rodoviário até Santarém, a combinação rodoviária-hidroviária até Barcarena é mais onerosa em US\$ 15,19 por tonelada métrica. As distâncias associadas a essa alternativa são de 672 milhas por rodovia (norte de Mato Grosso-Itaituba) e 558 milhas por hidrovia (Itaituba-Barcarena), totalizando 1.230 milhas.

A decomposição percentual dos custos evidencia que o transporte da origem no norte de Mato Grosso até Santarém representa 22,78% do custo total até Xangai, ao passo que, no trajeto via Barcarena, a participação do transporte interno alcança 25,53% (Figura 9). Embora a distância terrestre até Itaituba seja menor que até Santarém, o custo total do arranjo combinado rodoviário-hidroviário permanece superior, em razão da etapa fluvial adicional e dos respectivos custos portuários e de transbordo embutidos nos valores apresentados.

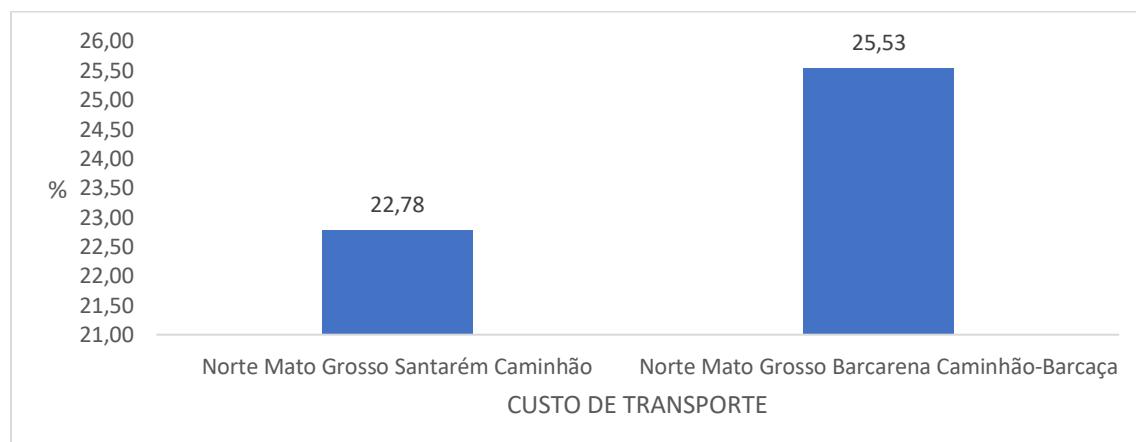


Figura 9. Relação Custo de Transporte sobre Custo Total, por Tipo de Modal, Transporte de Soja, Norte de Mato Grosso até Santarém e Barcarena, Primeiro Trimestre de 2025.

Fonte: *Brazil Soybean Transportation* (USDA, 2025a).

Análise de resultados

A Figura 10 apresenta os índices médios sazonais dos índices pluviométricos da Região Norte e das exportações brasileiras de soja, ambos com base 100. Para facilitar a interpretação, os valores foram classificados em faixas cromáticas: azul para $I > 100$; verde para $75 < I \leq 100$; alaranjado para $50 < I \leq 75$; amarelo para $25 < I \leq 50$; e vermelho para $0 < I \leq 25$. Em termos operacionais, apenas a classe vermelha sinaliza risco elevado de comprometimento da navegação hidroviária por níveis criticamente baixos. As demais classes, em princípio, são compatíveis com a navegação; contudo, mesmo na classe azul podem ocorrer restrições localizadas associadas a cheias (p. ex., correntezas mais fortes, janelas de operação mais estreitas e eventuais limitações em margens e estruturas), o que recomenda cautela na programação logística.

No que se refere aos índices sazonais das exportações de soja, observa-se trajetória ascendente a partir de fevereiro, com intensificação entre março e maio, mês em que se verifica o ápice. A partir de então, os embarques permanecem em patamar relativamente elevado, mas exibem tendência de declínio até o final do ano; janeiro é, em geral, o mês de menor volume exportado (Figura 10). O perfil obtido evidencia sazonalidade pronunciada do escoamento externo, com implicações diretas para a cadeia logística — alocação de frota, ocupação de terminais, disponibilidade de comboios e formação de fretes — ao longo do ciclo anual de colheita e embarque.

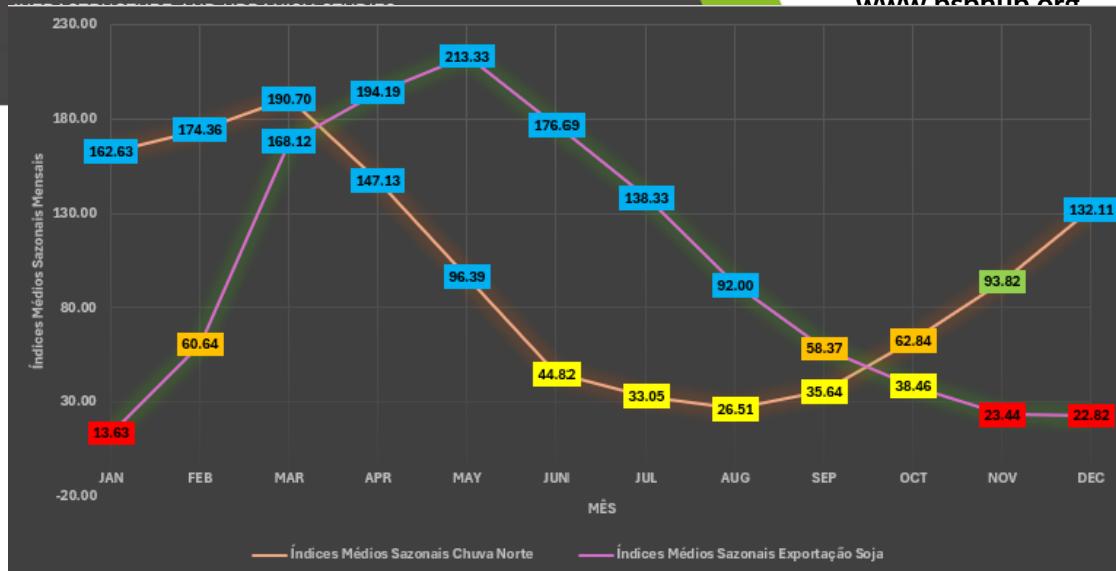


Figura 10. Índices Médios Sazonais Mensais, Índice Pluviométrico da Região Norte e Quantidade Exportada de Soja, Brasil.

Fonte: Elaborada pelos autores com base em dados do BDMEP.

Na Região Norte, a Figura 10 evidencia que o período de cheia se estende, em termos gerais, de novembro/dezembro a maio, enquanto a vazante prevalece de junho a setembro/outubro. Nesse enquadramento, a janela de maior vantagem operacional para o transporte hidroviário de cargas e passageiros coincide com os meses de cheia, quando o calado disponível tende a ser mais favorável à navegação.

A sazonalidade configura-se como o determinante mais relevante da navegabilidade nas hidrovias nortistas. O ciclo anual de cheias e secas, condicionado pelo regime de precipitações, orienta a logística, a capacidade de carga, a segurança e a viabilidade econômica das operações fluviais. A magnitude desse padrão pode ser summarizada pelo Coeficiente de Amplitude Sazonal (CAS) dos índices pluviométricos regionais, cujo valor estimado foi 75,59%, denotando variações sazonais expressivas ao longo do ano (conforme definição metodológica apresentada anteriormente).

O comportamento hidrológico amazônico apresenta ciclo marcadamente previsível, com fases de enchente (cheia), vazante (seca) e dois períodos de transição. A enchente ocorre, em média, entre dezembro e maio, com pico em torno de março, quando as chuvas se intensificam, ampliando a lâmina d'água, inundando várzeas e alargando o leito navegável. A vazante, típica de junho a novembro, atinge os níveis mais baixos por volta de julho/agosto, expondo bancos de areia e afloramentos rochosos e reduzindo a profundidade útil. As transições ocorrem entre outubro/novembro (início da subida) e abril/maio (início da descida).

Os efeitos operacionais desses regimes são assimétricos. Durante a cheia, a maior profundidade permite comboios de maior porte operarem com carga mais próxima da capacidade técnica, além de viabilizar rotas secundárias (paranás e furos) que encurtam trechos específicos; por outro lado, correntezas mais intensas, áreas extensas alagadas e instabilidades de margem podem elevar consumo de combustível, exigir potência adicional a montante e dificultar acessos e manobras. Na vazante, a redução das correntezas facilita a navegação contra o fluxo e tende a melhorar o acesso terrestre a alguns pontos de carga e descarga; entretanto, o calado limitado impõe *derating* significativo das embarcações, multiplica obstáculos como bancos móveis e pedrais, restringe a operação ao canal principal e aumenta o risco de bloqueios por encalhe em gargalos estreitos.

Dante desse quadro, práticas de adaptação e mitigação são decisivas. A gestão dinâmica de carga, ancorada em boletins hidrológicos e na definição do calado máximo seguro, tem sido combinada a estratégias de transbordo em pontos críticos durante a estiagem, à dragagem de manutenção em trechos assoreados, ao reforço da sinalização náutica em canais móveis e ao uso intensivo de sondas de profundidade, GPS e cartas eletrônicas atualizadas. No plano tático e estratégico, o planejamento de safras e expedições tende a concentrar maiores volumes na janela de cheia, compatibilizando oferta de frota, capacidade de terminais e janelas operacionais.

A leitura conjunta da Figura 10, que apresenta os índices sazonais de pluviometria e de exportações de soja, sugere comovimento parcial entre as séries no primeiro trimestre: entre janeiro e março, as exportações se elevam ao mesmo tempo em que o índice pluviométrico cresce até atingir ápice em março. Entre abril e maio, as exportações alcançam o máximo em maio, enquanto o índice de precipitação passa a declinar, ainda sem comprometer a navegabilidade. De maio a outubro, observa-se queda gradual dos embarques até o fim do ano, ao passo que o índice pluviométrico desce até um mínimo em agosto e retorna à trajetória ascendente a partir de então; no último trimestre, as exportações tendem a permanecer relativamente baixas.

A heterogeneidade por hidrovia é ilustrativa. Na Hidrovia do Madeira (Porto Velho-Itacoatiara), as condições de cheia comportam comboios substancialmente maiores do que na vazante, quando a formação precisa ser reduzida e trechos próximos a Guará-Mirim podem tornar-se pouco praticáveis. No Solimões/Amazonas, a cheia favorece a navegação de navios de maior calado até Manaus, ao passo que, na vazante, aumentam as restrições em pontos específicos. No Tocantins, o reservatório de Tucuruí confere certa regularização a montante, mas o trecho a jusante permanece fortemente

condicionado pela sazonalidade. No Tapajós, a dinâmica de bancos de areia móveis requer atualização frequente das cartas e maior prudência em manobras e comboios.

No âmbito das tendências, as médias anuais dos índices pluviométricos dessazonalizados indicam queda ao longo do período analisado (Figura 11). Entre 2003 e 2024, o valor médio anual recuou de 194,70 mm para 120,60 mm, correspondendo a -38,05% no intervalo, além de redução da amplitude após 2015. A tendência suavizada por HP e o ajuste log-linear no tempo corroboram o movimento descendente. A interpretação causal desse declínio requer cautela: mecanismos antropogênicos associados ao desmatamento — com efeitos potenciais sobre evapotranspiração, albedo e temperatura de superfície — são coerentes com a literatura, mas a atribuição robusta demanda controles para teleconexões climáticas, testes de quebras estruturais e estimativas específicas de atribuição climática. Nesse sentido, os resultados apresentados devem ser entendidos como evidência consistente de enfraquecimento do regime pluviométrico regional, cuja origem e magnitude relativa dos determinantes merecem investigação adicional.

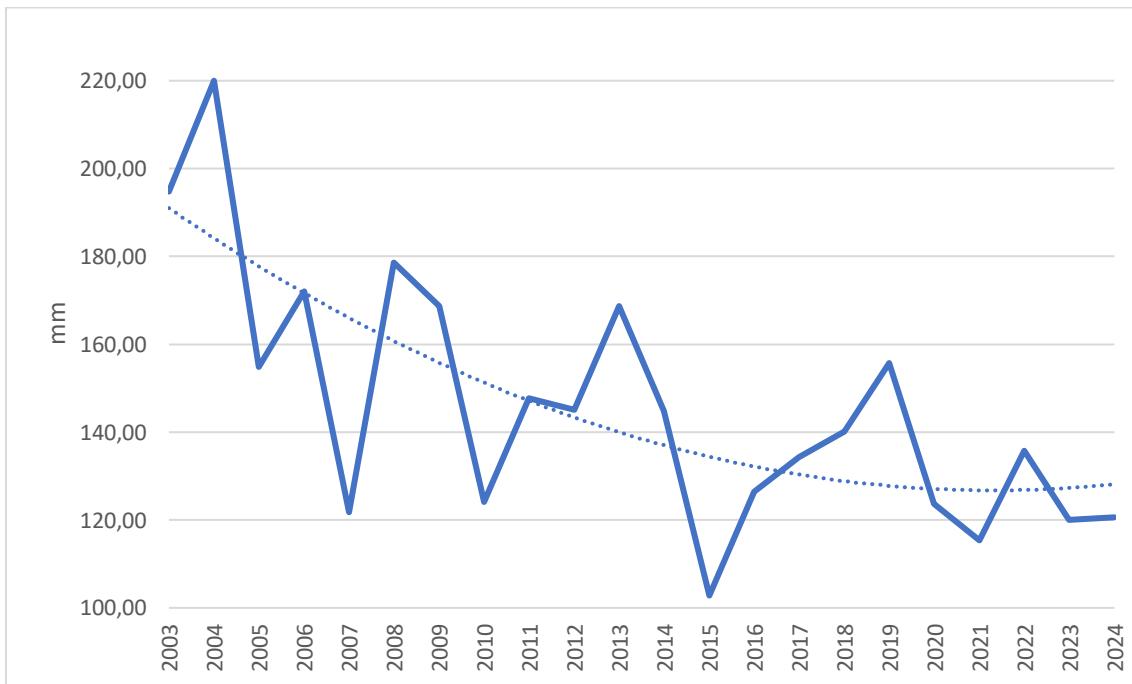


Figura 11. Índices Pluviométricos Médios Anuais Deseasonalizados, Região Norte, Brasil, 2003 – 2024.

Fonte: Elaborada pelos autores com base em dados do BDMEP.

Com o objetivo de aferir a dinâmica de longo prazo dos índices pluviométricos médios anuais dessazonalizados, estimou-se a taxa média de variação por meio de regressão no tempo, conforme a abordagem de Ramanathan (1998). Adotou-se especificação log-linear, de modo que o coeficiente da tendência foi interpretado como taxa média anual composta. O resultado indica contração de $-1,91\%$ a.a. no período analisado, sinalizando enfraquecimento persistente do regime pluviométrico regional.

Superada a discussão da sazonalidade, a atenção recaiu sobre os demais componentes — tendência e ciclo — com foco no horizonte de longo prazo. A extração desses componentes foi conduzida com o filtro de Hodrick–Prescott aplicado à série dessazonalizada e a datação de pontos de inflexão foi realizada pelo algoritmo de Bry–Boschan.

A notação empregada segue convenção usual: d11 denota a série dessazonalizada obtida via X-13-ARIMA-SEATS; hpt representa a tendência suavizada extraída pelo filtro HP; e hp corresponde ao ciclo, definido como o desvio da série dessazonalizada em relação à sua tendência. Na interpretação econômica, valores positivos do ciclo indicam precipitação acima de seu nível potencial de longo prazo, ao passo que valores negativos denotam precipitação abaixo desse patamar, sugerindo condições relativamente mais secas e possível estresse hídrico.

A Figura 12 apresenta a trajetória mensal da série d11 para a Região Norte entre janeiro de 2003 e maio de 2025, juntamente com sua tendência (hpt) e o respectivo ciclo (hp). Observa-se uma tendência decrescente ao longo de todo o intervalo: o valor tendencial recuou de 191,56 mm em jan/2003 para 111,63 mm em mai/2025, o que corresponde a variação acumulada de $-41,73\%$. Esse movimento é coerente com a taxa média anual negativa estimada e com a redução da amplitude observada sobretudo a partir de meados da década de 2010, reforçando a evidência de arrefecimento do regime pluviométrico regional no período.

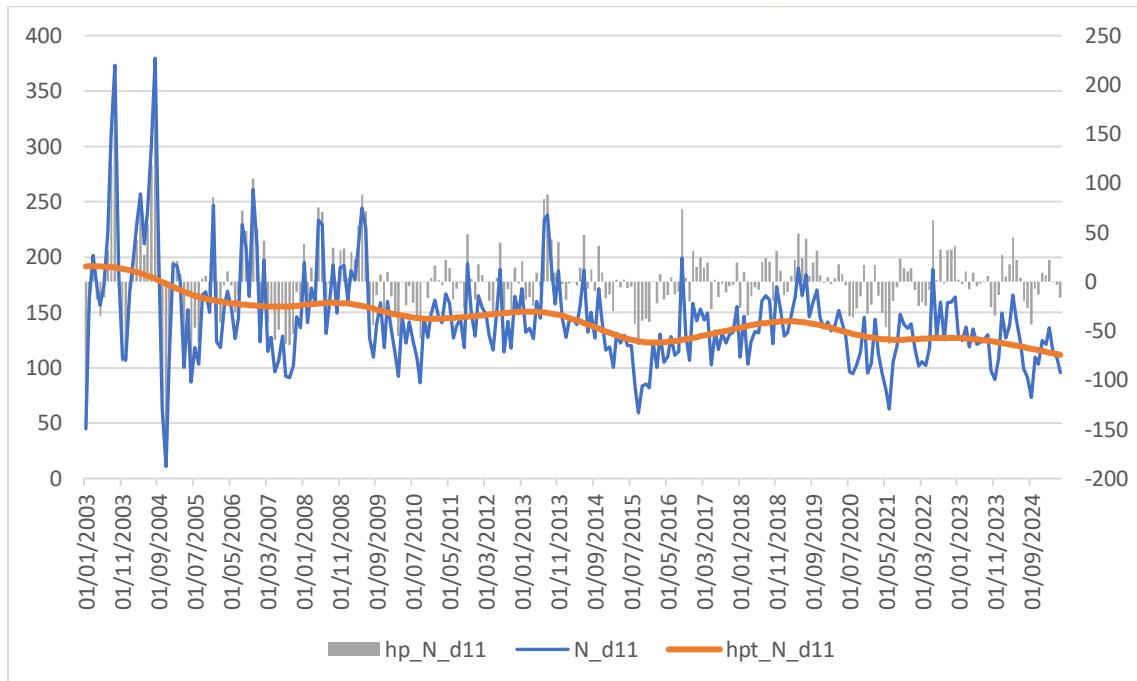


Figura 12. Resultados do Filtro HP, Série Original Dessazonalizada, Tendência e Ciclo, Índices Pluviométricos, Região Norte, Brasil, Janeiro de 2003 – Maio de 2025.

Fonte: Elaborada pelos autores com base em dados do BDMEP.

A Figura 13 apresenta a cronologia dos episódios com precipitação acima da média (faixas claras) e abaixo da média (faixas sombreadas). A Tabela 1 consolida as fases identificadas — CHUVA (+) e CHUVA (−) — bem como seu início, término, duração e amplitude. Observa-se que o intervalo mais prolongado de escassez se estendeu por 16 meses (de abril/2011 a agosto/2012), ao passo que o episódio mais longo de excesso perdurou por 12 meses (de setembro/2015 a setembro/2016).

A Tabela 2 apresenta o resultado integral do algoritmo de Bry–Boschan, com a enumeração das fases, datas de *turning points*, durações e níveis inicial e final, além das amplitudes correspondentes. Os achados confirmam a assimetria temporal destacada acima: além do episódio seco de 2011–2012 (16 meses), registra-se outro intervalo de escassez de 15 meses entre junho/2014 e setembro/2015, enquanto o episódio úmido mais longo permanece o de 2015–2016 (12 meses).

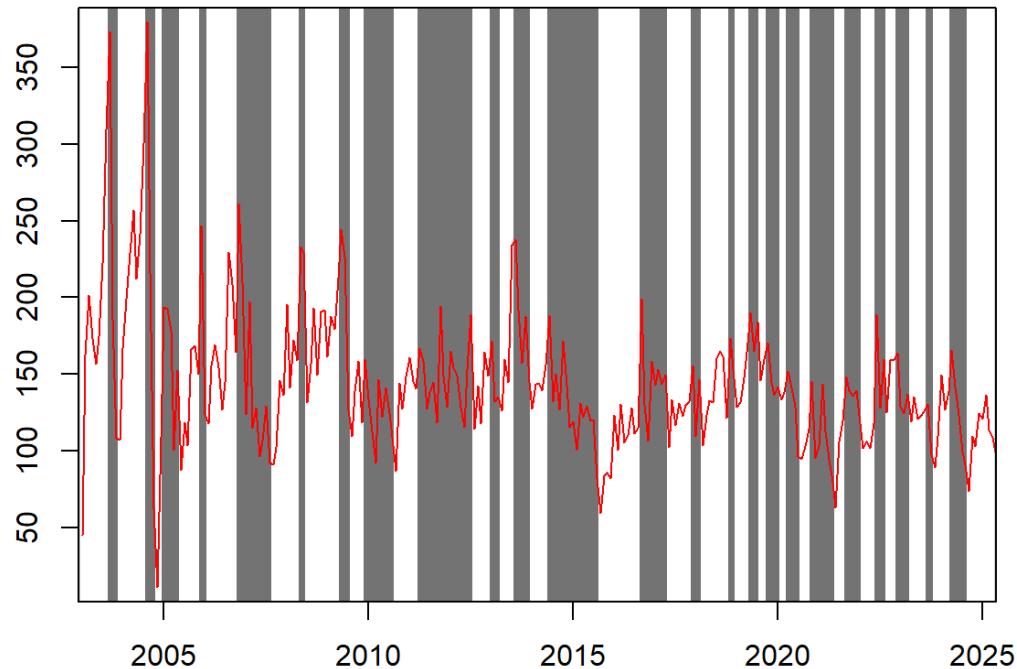
Pontos de Virada Identificados pelo Algoritmo de Bry-Boschan

Figura 13. Períodos de expansão e recessão, algoritmo Bry-Boschan, Índices Pluviométricos Mensais Dessaazonalizados, Região Norte, Brasil, Janeiro de 2003 a Maio de 2025.

Fonte: Elaborada pelos autores com base em dados do BDMEP.

Tabela 1. Resultados do Algoritmo Bry-Boschan, Fase, Início, Final, Duração, Nível Inicial, Nível Final e Amplitude, Índices Pluviométricos Mensais Dessazonalizados, Região Norte, Brasil, Janeiro de 2003 a Maio de 2025

	Fase	Início	Fim	Duração	Nível Inicial	Nível Final	Amplitude
1	CHUVA (+)	<NA>	2003M9	NA	NA	373	NA
2	CHUVA (-)	2003M9	2003M12	3	373	107	266
3	CHUVA (+)	2003M12	2004M8	8	107	380	272.6
4	CHUVA (-)	2004M8	2004M11	3	380	11	368.8
5	CHUVA (+)	2004M11	2005M1	2	11	194	182.7
6	CHUVA (-)	2005M1	2005M6	5	194	87	106.4
7	CHUVA (+)	2005M6	2005M12	6	87	247	159.4
8	CHUVA (-)	2005M12	2006M2	2	247	118	128.5
9	CHUVA (+)	2006M2	2006M11	9	118	261	143
10	CHUVA (-)	2006M11	2007M9	10	261	91	170.2
11	CHUVA (+)	2007M9	2008M5	8	91	233	142.4
12	CHUVA (-)	2008M5	2008M7	2	233	131	102
13	CHUVA (+)	2008M7	2009M5	10	131	244	113.2
14	CHUVA (-)	2009M5	2009M8	3	244	109	135
15	CHUVA (+)	2009M8	2009M12	4	109	160	50.2
16	CHUVA (-)	2009M12	2010M9	9	160	87	72.9
17	CHUVA (+)	2010M9	2011M4	7	87	167	80.2
18	CHUVA (-)	2011M4	2012M8	16	167	114	52.8
19	CHUVA (+)	2012M8	2013M1	5	114	172	57.6
20	CHUVA (-)	2013M1	2013M4	3	172	126	45.5

21	CHUVA (+)	2013M4	2013M8	4	126	238	111.6
22	CHUVA (-)	2013M8	2014M1	5	238	127	110.4
23	CHUVA (+)	2014M1	2014M6	5	127	188	60.9
24	CHUVA (-)	2014M6	2015M9	15	188	59	128.8
25	CHUVA (+)	2015M9	2016M9	12	59	199	139.6
26	CHUVA (-)	2016M9	2017M5	8	199	103	96.5
27	CHUVA (+)	2017M5	2017M12	7	103	155	52.8
28	CHUVA (-)	2017M12	2018M3	3	155	103	52
29	CHUVA (+)	2018M3	2018M11	8	103	173	69.7
30	CHUVA (-)	2018M11	2019M1	2	173	129	44.5
31	CHUVA (+)	2019M1	2019M5	4	129	190	61.7
32	CHUVA (-)	2019M5	2019M8	3	190	146	44.3
33	CHUVA (+)	2019M8	2019M10	2	146	170	24.4
34	CHUVA (-)	2019M10	2020M2	4	170	134	36.9
35	CHUVA (+)	2020M2	2020M4	2	134	152	18.2
36	CHUVA (-)	2020M4	2020M8	4	152	94	57.4
37	CHUVA (+)	2020M8	2020M11	3	94	145	51
38	CHUVA (-)	2020M11	2021M6	7	145	63	82.6
39	CHUVA (+)	2021M6	2021M9	3	63	149	85.8
40	CHUVA (-)	2021M9	2022M2	5	149	102	46.9
41	CHUVA (+)	2022M2	2022M6	4	102	189	87.4
42	CHUVA (-)	2022M6	2022M9	3	189	125	63.9
43	CHUVA (+)	2022M9	2022M12	3	125	164	38.6
44	CHUVA (-)	2022M12	2023M4	4	164	119	44.9

45	CHUVA (+)	2023M4	2023M9	5	119	130	11.3
46	CHUVA (-)	2023M9	2023M11	2	130	89	40.8
47	CHUVA (+)	2023M11	2024M4	5	89	166	76.5
48	CHUVA (-)	2024M4	2024M9	5	166	73	92.4
49	CHUVA (+)	2024M9	<NA>	NA	73	NA	NA

Fonte: Elaborada pelos autores com base em dados do BDMEP.

Tabela 2. Resumo dos Resultados do Algoritmo de Bry-Boschan, Fase, Amplitude e Duração, Índices Pluviométricos Mensais Dessazonais, Região Norte, Brasil, Janeiro de 2003 a Maio de 2025

Fase	Amplitude	Duração
Expansão (Chuva (+))	90,9	5,5
Recessão (Chuva (-))	99,6	5,2

Fonte: Elaborada pelos autores com base em dados do BDMEP.

O resumo da Tabela 3 indica diferenças nítidas em intensidade e persistência. Em termos de amplitude, as fases com chuva abaixo da média são mais severas (média de 99,6 mm) do que as fases com chuva acima da média (média de 90,9 mm), sugerindo que os períodos secos tendem a ser mais intensos. Em termos de duração, contudo, os episódios acima da média são ligeiramente mais longos (5,5 meses) do que os abaixo da média (5,2 meses). Considerando o tempo total em cada regime, verifica-se equilíbrio: 126 meses em CHUVA (+) e 126 meses em CHUVA (-).

Tabela 3. Resumo dos resultados do algoritmo de Bry-Boschan, Fase, Meses e Percentual, Índices Pluviométricos Mensais Dessazonais, Região Norte, Brasil, Janeiro de 2003 a Maio de 2025

Fases	Meses	Percentual
Chuva (-)	126	50,00
Chuva (+)	126	50,00
Total	252	100,00

Fonte: Elaborada pelos autores com base em dados do BDMEP.

Do ponto de vista de competitividade internacional, os condicionantes da ampliação do *market share* brasileiro frente aos Estados Unidos estão associados, entre outros fatores, à expansão do escoamento via Arco Norte e à consequente redução de custos logísticos. Evidências apresentadas em Salin e Somwaru (2020) sugerem que a participação dos EUA no mercado global pode encolher de 3 a 6 pontos percentuais adicionais caso a infraestrutura de transporte “da fazenda ao porto” não seja substancialmente aprimorada; estima-se que 1 p.p. de perda de participação represente mais de meio bilhão de dólares em exportações. Embora os custos totais dos EUA (incluindo o transporte até a Ásia) tenham sido, historicamente, geralmente menores do que os sul-americanos, melhorias recentes na logística brasileira vêm estreitando essa diferença, em combinação com custos de produção relativamente baixos, expansão de área, ganhos de produtividade, depreciação cambial e, mais recentemente, a disputa comercial EUA–China. Nesse contexto, e diante da redução da demanda chinesa por soja norte-americana em 2018 devido à imposição de tarifas, o Brasil consolidou-se como maior produtor e exportador mundial, amparado por um sistema de transporte gradualmente mais equilibrado e eficiente, conforme ilustrado nas iniciativas resumidas no Quadro 1.

Quadro 1. Fatores Condicionantes do Aumento da Competitividade do Setor de Soja do Brasil Frente aos Estados Unidos

Ano	Fatores Condicionantes
2011	A resolução ANTT n.4661/2011, exigiu que ferrovias vendessem direitos de uso de capacidade ociosa
2013	Um terminal intermodal de grãos foi construído, facilitando o fluxo de grãos de Rondonópolis, Mato Grosso, para o porto de Santos.
2014	Uma nova rota de exportação foi criada de Miritituba para Barcarena (Vila do Conde), adicionando uma nova porta de entrada no norte para exportações do Mato Grosso.
2019	A rodovia BR-163 foi totalmente pavimentada, reduzindo o tempo de viagem da "primeira etapa" de exportação de grãos de Sorriso para Itaituba/Miritituba para cerca de 35 horas.

Fonte: Salin and Agapi Somwaru (2020).

Conclusões

O Brasil consolidou-se como maior produtor e exportador de soja em grão. Tal desempenho decorre não apenas da elevada produtividade no Centro-Oeste, mas também de ganhos logísticos associados à redução de custos de escoamento, viabilizados por investimentos em infraestrutura no Arco Norte e pela integração de modais rodoviário, ferroviário e, sobretudo, hidroviário. As condições hidroclimáticas e a configuração da rede fluvial da Região Norte conferem vantagens comparativas ao transporte por hidrovias, contribuindo para a competitividade da soja brasileira em relação à produção de concorrentes, em particular os Estados Unidos.

Embora o modal rodoviário ainda predomine, registraram-se, entre 2017 e 2025, investimentos relevantes na conexão entre armazéns e hidrovias, com foco no Arco Norte, em busca de soluções logísticas mais eficientes e ambientalmente sustentáveis. À luz do Anuário Agrologístico (2025), o fortalecimento desse corredor — com destaque para ferrovias e hidrovias, articuladas à expansão da capacidade de armazenagem na origem — configura pilar central para sustentar a competitividade do agronegócio brasileiro no cenário internacional.

Sob as dimensões econômica e ambiental, os portos do Arco Norte vêm ampliando sua participação nas exportações de grãos, com ênfase na soja, em razão da proximidade das novas fronteiras agrícolas (como o MATOPIBA) e do norte de Mato Grosso. Em termos de custos, o escoamento por rotas do Arco Norte tende a ser mais econômico do que o envio da soja do norte de Mato Grosso para Santos ou Paranaguá exclusivamente por rodovia. Indicadores recentes ilustram a trajetória de expansão: o porto de Itaqui (MA) elevou os embarques de grãos de 11,2 milhões de toneladas em 2020 para 20,2 milhões de toneladas em 2024 ($\approx 80,3\%$), enquanto Barcarena (PA) apresentou avanço acumulado de cerca de 70,3% no mesmo período. Persistem, contudo, restrições decorrentes de eventos climáticos, como secas severas, que afetam a navegabilidade de hidrovias estratégicas (Madeira, Tapajós e Amazonas) e impõem custos adicionais à operação.

Nesse contexto, a compreensão minuciosa do regime de chuvas na Região Norte — tanto no curto prazo (sazonalidade) quanto no longo prazo (tendência e ciclo) — mostra-se essencial para o planejamento operacional e a redução de custos das empresas de logística, em especial aquelas dedicadas ao transporte hidroviário. Os resultados apresentados apontam sazonalidade pronunciada e tendência descendente dos índices pluviométricos dessazonalizados ao longo do período analisado, com enfraquecimento relativo do regime de precipitações.

A interpretação desses achados sugere a necessidade de políticas públicas integradas de adaptação e mitigação. A evidência de queda sistemática da precipitação é consistente com potenciais efeitos de pressões antrópicas — como o desmatamento — sobre processos de reciclagem de umidade, albedo e temperatura de superfície; entretanto, a atribuição causal demanda investigação adicional, com controle para teleconexões climáticas e testes de robustez. Em termos práticos, recomenda-se o aprimoramento do monitoramento hidrometeorológico, a priorização de investimentos em infraestrutura mais resiliente (inclusive janelas de dragagem, sinalização e gestão dinâmica de calado), e a proteção de ativos ambientais críticos, de modo a preservar as condições necessárias à eficiência e à segurança do transporte hidroviário no Arco Norte.

Como agenda de pesquisa futura, recomenda-se o aprofundamento da análise por meio da incorporação de modelos climáticos regionais de alta resolução e de técnicas de atribuição causal que permitam distinguir os efeitos antrópicos e naturais sobre a variabilidade pluviométrica. A integração de dados de desmatamento, cobertura vegetal e temperatura de superfície — provenientes de fontes como o PRODES/INPE e o

MapBiomas — poderá elucidar de forma mais robusta as relações entre alterações no uso do solo e o enfraquecimento do regime de chuvas na Amazônia. No campo da logística, sugere-se o desenvolvimento de modelos preditivos para simular os impactos de cenários climáticos alternativos sobre a navegabilidade e os custos de transporte hidroviário, incorporando variáveis como calado dinâmico, custo de dragagem e frequência de interrupções operacionais. Tais avanços contribuirão não apenas para o aprimoramento do planejamento estratégico do Arco Norte, mas também para a formulação de políticas públicas voltadas à adaptação climática e à sustentabilidade do agronegócio brasileiro no longo prazo.

Literatura citada

BRY, G.; BOSCHAN, C. *Cyclical analysis of time series: selected procedures and computer programs*. Nova York: National Bureau of Economic Research, 1971.

COMEXSTAT. Estatísticas de comércio exterior. Disponível em: <<https://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>>. Acesso em: 28 out. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Séries históricas – soja. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/series-historicas/graos/soja>>. Acesso em: 28 out. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Hidrovia do Amazonas. 19 nov. 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/intervencao-em-hidrovias/hidrovias-1/copy_of_hidrovia-do-amazonas>. Acesso em: 07 out. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Hidrovia do Madeira. 19 nov. 2021b. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/intervencao-em-hidrovias/hidrovias-1/hidrovia-do-madeira>>. Acesso em: 07 out. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Hidrovia do Solimões. 19 nov. 2021c. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/intervencao-em-hidrovias/hidrovias-1/hidrovia-do-solimoes>>. Acesso em: 07 out. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Hidrovia do Tapajós - Teles Pires. 19 nov. 2021d. Disponível em:

<<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/intervencao-em-hidrovias/hidrovias-1/hidrovia-do-tapajos-teles-pires>>. Acesso em: 07 out. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT.

Hidrovia do Tocantins - Araguaia. 19 nov. 2021e. Disponível em:

<<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/intervencao-em-hidrovias/hidrovias-1/hidrovia-do-tocantins-araguaia>>. Acesso em: 07 out. 2025.

FREITAS, S. M. de; FERREIRA, C. R. R. P. T.; BARBOSA, M. Z. Oportunidades e entraves à expansão de dendicultura brasileira. *Agricultura em São Paulo*, v. 45, n. 2, p. 1–16, abr. 1998.

HODRICK, R.; PRESCOTT, E. C. Postwar U.S. business cycles: an empirical investigation. *Journal of Money, Credit, and Banking*, v. 29, n. 1, p. 1–16, 1997. DOI: <https://doi.org/10.2307/2953682>.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa – BDMEP. 2025. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 28 out. 2025.

MARGARIDO, M. A. Análise da série de vendas do varejo restrito no Estado de São Paulo: uma aplicação do Método X12-ARIMA. *Revista IPT: Tecnologia e Inovação*, v. 5, n. 17, p. 76–94, ago. 2021.

MARGARIDO, M. A.; SHIKIDA, P. F. A.; KOMESU, D. K. Análise das Apreensões de Cigarros Contrabandeados no Estado do Paraná: uma aplicação de modelos de séries temporais. *Revista de Economia e Agronegócio*, v. 23, n. 1, p. 1–21, 2025.

MARGARIDO, M. A.; TUROLLA, F. A. Brazilian soybeans: quo vadis? *Theoretical and Applied Economics*, v. XXXI, n. 1(638), p. 137–160, primavera 2024.

RAMANATHAN, R. *Introductory Econometrics with Applications*. 4. ed. United States: The Dryden Press, 1998. 664 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. *Brazil Soybean Transportation*. Agricultural Marketing Service, 1st Quarter 2025 (January, February, March). Jun. 2025a. Disponível em: <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Brazil_Quarter1_2025.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. *Brazil Soybean Transportation*. Agricultural Marketing Service, 2nd Quarter 2025 (April, May, June). Ago. 2025b. Disponível em:
https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Brazil_Quarter2_2025.pdf.

SALIN, D. L.; SOMWARU, A. *The Impact of Brazil's Infrastructure and Transportation Costs on U.S. Soybean Market Share: An Updated Analysis From 1992–2019*. U.S.