
MODELAGEM ECONÔMETRICA DA DEMANDA POR VOOS CARGUEIROS EM AEROPORTOS CONCESSIONADOS DO NORDESTE DO BRASIL

Econometric modeling of cargo flight demand at concessioned airports in northeast Brazil

Hélio da Silva Queiroz Júnior

Engenheiro Civil. Doutor em Engenharia Civil e Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Docente do Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Campus Salvador. Av. Prof. Aristides Novis, 1235, Federação, Salvador, BA, 40210-630. helioqueiroz@ufba.br

Viviane Adriano Falcão

Engenheira Civil. Doutora em Engenharia de Transportes. Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Campus Recife. Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife, PE, 50670-901. viviane.afalcao@ufpe.br

Francisco Gildemir Ferreira da Silva

Engenheiro Civil. Doutor em Economia. Docente do Programa de Pós-Graduação em Transportes da Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF, 70910-900. Docente do Programa Pós-Graduação de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, Campus Fortaleza. Rua Marechal Deodoro, 400, sala 410, Benfica, 60020-060, Fortaleza, CE. gildemir@ufc.br

Resumo: O aumento da demanda por transporte aéreo de carga no Brasil, especialmente nos aeroportos do Nordeste, é relevante diante das mudanças econômicas e sociais que afetam a logística regional. Este estudo analisa como diversos fatores influenciam essa demanda, com o objetivo de desenvolver um modelo preditivo para estimar a demanda de voos cargueiros nos aeroportos concedidos do bloco Nordeste, considerando variáveis econômicas e operacionais. Utilizando um banco de dados em painel mensal, foram aplicados métodos econométricos, como Mínimos Quadrados Ponderados (WLS) e modelos de contagem com distribuição de Poisson, para avaliar a relação entre variáveis e a demanda de carga aérea. Os resultados mostram que o PIB e a conectividade entre aeroportos são fatores significativos para a demanda de cargueiros, com o modelo de contagem apresentando o melhor ajuste. O estudo contribui para a compreensão da dinâmica da demanda, sugerindo a importância de uma gestão integrada nos aeroportos.

Palavras-chave: demanda, carga aérea, logística, aeroportos concedidos, métodos econométricos.

Abstract: The increase in demand for air cargo transportation in Brazil, especially at airports in the Northeast, is significant in light of the economic and social changes affecting regional logistics. This study analyzes how various factors influence this demand, aiming to develop a predictive model to estimate the cargo flight demand at Northeast concessioned airports, considering economic and operational variables. Using a monthly panel data set, econometric methods such as Weighted Least Squares (WLS) and Poisson distribution count models were applied to evaluate the relationship between variables and air cargo demand. Results indicate that GDP and airport connectivity are significant factors influencing cargo flight demand, with the count model showing the best fit. This study contributes to understanding demand dynamics, suggesting the importance of integrated airport management.

Keywords: demand, air cargo, logistics, concessioned airports, econometric methods.

1 INTRODUÇÃO

Correspondendo à movimentação de cerca de 35% do valor das mercadorias globalmente em 2018 (IATA, 2018), chegando a aproximadamente 40% já em 2024 (Karunathilake; Fernando, 2024), o setor de carga aérea apresenta o crescimento atrelado ao desenvolvimento regional e do *e-commerce*.

No Brasil, a privatização dos aeroportos tem início em 2011, sendo realizadas sete rodadas de concessões de aeroportos ao setor privado com diferentes modelos de concessão aplicados, desde a concessão individual de aeroportos de grande porte, até a concessão em blocos a partir da quinta rodada (Falcão *et al.*, 2021), na qual houve a inclusão de aeroportos regionais deficitários em relação ao potencial de demanda que poderia ser atendido.

Inicialmente, os contratos visavam ao crescimento da demanda pela aviação regular de passageiros. Sem uma análise de mercado abrangente, algumas incertezas econômicas são atribuídas para os blocos de concessão com aeroportos regionais, em que o aeroporto principal assume a responsabilidade de gerar receitas suficientes para cobrir suas operações, desenvolver infraestrutura e subsidiar outros aeroportos de balanço negativo.

Em teoria, uma rede mais ampla, com um sistema de aeroportos gerenciado por uma mesma concessionária, auxiliaria na tomada de decisões das empresas aéreas e de logística. Essas conexões são debatidas por Boonekamp e Burghouwt (2017), uma vez que os maiores hubs, como Aeroporto Internacional do Recife/Guararapes - Gilberto Freyre (SBRF), carregam a maior parte da carga aérea devido a suas extensas redes de passageiros, enquanto aeroportos menores teriam foco no desenvolvimento em carga, resultando em maior operação em aeronaves dedicadas, os cargueiros.

Logo, novos parâmetros são atribuídos aos modelos de concessão em grupo. A possibilidade de desenvolvimento de um modelo de negócios com maior amplitude, deve garantir ao contrato flexibilidade nas operações a serem adotadas para os aeroportos regionais pertencentes aos blocos.

Assim, o potencial de expansão do mercado de logística oferecido pelos aeroportos regionais permite ampliar a capacidade de geração de receitas, atendendo à demanda específica de carga aérea que não foi contemplada nos contratos originais de concessão. Logo, a presente pesquisa tem como objetivo desenvolver um modelo capaz de prever a demanda por cargueiros nos aeroportos concedidos brasileiros, tendo como estudo os aeroportos pertencentes ao bloco Nordeste — aeroportos de Recife (SBRF), João Pessoa (SBJP), Maceió (SBMO), Aracaju (SBAR), Campina Grande (SBKG) e Juazeiro do Norte (SBJU). Com isso, busca-se também identificar os principais fatores que influenciam o crescimento da demanda de carga aérea em aeroportos da Região.

Assim, ao analisar a complexidade da cadeia de suprimentos para carga aérea, que envolve múltiplas partes interessadas com objetivos potencialmente conflitantes, juntamente ao estudo do potencial de demandas específicas não consideradas nos contratos de concessão aeroportuários do Brasil, desenvolve-se uma linha de estudos pouco explorada na literatura especializada, que se dedique a especialidade de redes de carga em comparação com as redes de passageiros (Bomebelli *et al.*, 2020).

Com isso, a hipótese levantada é a de que a operação da carga pode ser um adicional à receita dos aeroportos regionais brasileiros, desde que seja observado um potencial de demanda nesses aeroportos. Dessa forma, busca-se responder à questão de como modelar essa demanda permitindo a previsão futura das operações de cargueiros para os aeroportos do bloco Nordeste.

2 CONCESSÕES AEROPORTUÁRIAS NO BRASIL

A construção de modelos de concessão aeroportuária decorre da necessidade de melhoria da eficiência e desempenho, da atração de novos investimentos, da melhoria da qualidade da gestão e diversificação, da melhoria da qualidade do serviço, da geração de ganhos no bem-estar social para a Região, favoráveis ao setor público (Graham, 2020).

O Brasil inicia o processo de concessão numa situação posterior ao cenário de crise econômica mundial de 2008, ocorrendo apenas em 2011 e envolvendo a mudança da gestão pública desses aeródromos da empresa estatal de gerenciamento de aeroportos (INFRAERO) a empresas privadas de todo o mundo, justificada como uma alternativa à responsabilidade pública exclusiva e ao ônus que isso impõe sobre as contas públicas.

Como descrito por Falcão *et al.* (2022), o programa de concessões para os aeroportos brasileiros resultou em 59 aeroportos sendo concedidos à gestão privada. Contudo, apesar de as concessões no Brasil terem sido analisadas indicando ganhos de eficiência operacional, como também em fatores econômicos regionais e nacionais (Da Silva *et al.*, 2019; Domingos *et al.*, 2020; Galdiano *et al.*, 2019; Rocha *et al.*, 2020; Falcão *et al.*, 2022), os aeroportos pertencentes às primeiras rodadas de concessão tiveram seus contratos renegociados ou até encerrados por parte da concessionária em um período consideravelmente menor do que o planejado.

Nesse contexto, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), órgão responsável pela realização e fiscalização dos contratos de concessão nacionais, adotou a estratégia de implementar concessões em blocos. As propostas de concessões em blocos visam garantir a estabilidade de mudança de governanças para regiões remotas ou turísticas que antes não faziam parte do planejamento das concessões (Xua *et al.*, 2019).

No novo modelo brasileiro, um conjunto de aeroportos com menores operações, principalmente aeroportos de capitais menores ou regionais, é agrupado em um contrato junto a um aeroporto de maior demanda. À época, a análise de Toledo *et al.* (2021) revelou uma melhora na eficiência dos aeroportos membros dos contratos em blocos em relação às primeiras rodadas de concessões dos aeroportos brasileiros.

Por outro lado, o modelo de concessão em blocos trouxe à tona uma preocupação quanto à competição direta entre aeroportos membros de um mesmo grupo concedido. Apesar das áreas de captação de demanda possivelmente conflitantes, o fator determinante analisado pela ANAC não muda em relação aos primeiros contratos (Brasil, 2011), nos quais o retorno de investimentos em melhorias da infraestrutura dos aeroportos concedidos por parte da concessionária se baseia em atender o crescimento das demandas de passageiros e voos comerciais (Brasil, 2019).

Dessa forma, uma lacuna é gerada no potencial de desenvolvimento dos aeroportos pertencentes aos blocos. A demanda por carga aérea pode então ser condicionada ao crescimento da aviação comercial de passageiros.

O potencial de desenvolvimento de aeroportos regionais baseados no transporte de carga aérea é apresentado por Babagolzadeh *et al.* (2022), os quais destacam que o redirecionamento do transporte de carga aérea de aeroportos maiores para aeroportos regionais próximos pode trazer benefícios como a redução de congestionamento nos centros urbanos e o desenvolvimento econômico regional. Os autores argumentam que, além de explorar infraestruturas subutilizadas e reduzir custos operacionais, esse modelo pode melhorar a logística e o fluxo de carga, criando oportunidades para o desenvolvimento regional.

Yuen *et al.* (2017) debatem o potencial de desenvolvimento da demanda de carga com a redistribuição entre aeroportos membros de um mesmo grupo ou com áreas de captação de demanda conflitantes, como o caso dos aeroportos concedidos em bloco no Brasil, de modo que a introdução de aeroportos com foco na operação de carga pode melhorar o bem-estar agregado nesses aeroportos, assim como no aeroporto com foco na operação de passageiros do mesmo grupo.

No entanto, tanto o modelo de Babagolzadeh *et al.* (2022) quanto o de Yuen *et al.* (2017) enfatizam a necessidade de subsídios para tornar a operação de carga aérea em aeroportos regionais mais rentável para as empresas de transporte, incentivando a adoção dessas rotas alternativas.

3 PREVISÃO DA DEMANDA DE CARGA AÉREA

A previsão da demanda de carga aérea é influenciada por uma combinação de fatores econômicos, tecnológicos e de mercado (Alexander; Merkert, 2023). O crescimento econômico, o desenvolvimento do *e-commerce*, a utilização de aeroportos regionais e a inovação em logística são elementos cruciais para entender e prever a demanda futura (IATA, 2021). Além disso, a relação entre a demanda e a oferta é dinâmica e requer um equilíbrio cuidadoso para garantir a sustentabilidade do setor de transporte aéreo de carga.

Para analisar os fatores que indicam a existência e o potencial crescimento da demanda de carga em um aeroporto, é necessário considerar as particularidades das regiões em que ele está inserido. Com esse objetivo, estudos são realizados visando desenvolver modelos de previsão que combinem o método e as variáveis explicativas mais adequados para obter uma resposta preditiva mais precisa, conforme exemplificado no Quadro 1.

Dentre as variáveis mais comumente aplicadas, os fatores socioeconômicos se destacam. Akinyemi (2023) caracteriza a previsão da demanda de carga aérea como sendo influenciada por uma combinação desses fatores econômicos. Das relações existentes, o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) e as exportações de mercadorias têm um impacto positivo significativo na demanda de carga aérea, especialmente em países africanos como Egito, Nigéria e África do Sul. Além disso, é ressaltada a relação entre a demanda e a oferta como dinâmica, uma vez que a elasticidade da demanda em relação à renda real indica que um aumento na renda pode levar a um crescimento maior na demanda de carga aérea.

As mesmas relações são observadas por Alexander e Merkert (2021) ao realizarem a aplicação de modelos de gravidade para prever e avaliar o mercado de frete aéreo internacional dos Estados Unidos da América (EUA), especialmente em resposta a choques econômicos significativos, como a Crise Financeira Global (GFC). Ao incorporarem variáveis socioeconômicas a uma abordagem metodológica econométrica clássica, variáveis como população, PIB e atividade industrial são classificados como fatores atrativos relevantes para o comércio aéreo, enquanto o tempo se destaca como um fator crítico, dado que o frete aéreo é frequentemente utilizado para o transporte de mercadorias sensíveis ao tempo, no qual a rapidez é essencial.

O impacto da variação do PIB na demanda de transporte aéreo de carga também pode ser generalizado para economias em desenvolvimento da América Latina, como destacam Anguita e Olariaga (2023). A pesquisa destaca que a demanda internacional de carga aérea desses países é fortemente dependente do PIB e do PIB *per capita*, enquanto a demanda doméstica é significativamente dependente do PIB *per capita*. Isso reflete a importância dos indicadores econômicos na previsão da demanda de carga aérea em um contexto latino-americano, onde o crescimento econômico pode ter um impacto direto na demanda por serviços de transporte aéreo.

Por outro lado, numa abordagem em que se consideram efeitos fixos de aeroportos em vez de efeitos fixos de países para modelar a rede de tráfego aéreo, Baier *et al.* (2022) verificaram uma representação mais precisa das interações entre aeroportos, superando desafios técnicos que anteriormente limitavam a aplicação de modelos de gravidade com muitas variáveis de controle. Esse retorno de modelo parcimonioso deve ser atrelado ao emprego de um estimador de máxima verossimilhança pseudo-Poisson (PPML) para lidar com problemas de heteroscedasticidade e valores zero no conjunto de dados, garantindo resultados mais consistentes.

Karunathilake e Fernando (2024) adotaram uma abordagem para identificar os fatores que influenciam o crescimento da demanda de carga aérea que pudessem ser generalizados para outras zonas ao redor do mundo. Assim, além dos fatores econômicos como PIB, câmbio e inflação, fatores de mercado, como a demanda, balanças econômicas e a participação do mercado aéreo na Região, podem ser ampliados com a inclusão de novos fatores relacionados aos contextos econômicos específicos.

Quadro 1 – Estudos de previsão da demanda de carga aérea

Estudo	Método(s) aplicado(s)	Variáveis explicativas	Métrica de Desempenho	Valor obtido de desempenho
Akinyemi (2023)	Abordagem de <i>lag</i> distribuído autorregressivo - ARDL.	PIB <i>per capita</i> , as exportações de mercadorias, o investimento estrangeiro direto, a taxa de juros real e o preço do combustível de aviação.	R ² ajustado	- Kenya: 0,2117 - Egito: 0,6428 - Nigeria: 0,4965 - África do Sul: 0,4440
Alexander e Merkert (2021)	Modelagem gravitacional com formulação log-linear, utilizando a técnica de regressão de Mínimos Quadrados Ordinários (OLS).	Fatores socioeconômicos, geográficos e de integração comercial.	R ² ajustado	- Modelo de commodities de alto valor: 0,898 - Modelo de commodities de baixo valor: 0,816
Anguita e Olariaga (2023)	ConvLSTM2D, que combina redes neurais convolucionais e recorrentes para uma análise espaço-temporal eficaz.	PIB, PIB <i>per capita</i> , População, Índice de Produção Industrial, Índice de Preços ao Consumidor, Câmbio, Investimento Estrangeiro Direto, Exportações, Importações, Carga Aérea Doméstica e Internacional.	Erro percentual absoluto médio (MAPE)	- Modelo internacional de demanda: 2,51 - Modelo doméstico de demanda: 2,14
Baier, Berster e Gelhausen (2022)	Modelo de gravitação global utilizando a estimação de Máxima Verossimilhança Pseudo-Poisson (PPML)	Distância entre os aeroportos, PIB <i>per capita</i> dos países de origem e destino e binários referentes a: contingência, língua comum, histórico colonial entre os países.	Pseudo-R ²	0,7502
Karunathilake e Fernando (2024)	Processo Analítico Hierárquico (AHP) e a análise de regressão linear.	População, crescimento populacional, PIB, crescimento do PIB, capacidade do aeroporto, índice de conectividade, emissões de CO ₂ e taxa de emprego.	R ² ajustado	0,484
Madhavan <i>et al.</i> (2020)	<i>Autoregressive Integrated Moving Average</i> (ARIMA) e <i>Bayesian Structural Time Series</i> (BSTS).	Carga e passageiros transportados.	Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE)	- ARIMA carga internacional: 4,07% - ARIMA carga doméstica: 4,97% - BSTS carga internacional: 3,82% - BSTS carga doméstica: 4,16%
Yang <i>et al.</i> (2022)	Regressão de Vetor de Suporte (SVR) e Regressão de Vetor de Suporte Baseado em Fuzzy (FSVR).	Volume de tráfego, fatores sazonais e características geográficas dos aeroportos.	Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE)	- ARIMA: 11,442% - SARIMA: 6,299% - SVR: 6,625% - FSVR: 1,019%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Yang *et al.* (2022) caracterizam ainda a questão das flutuações sazonais nos dados de carga aérea, uma vez que ocorrem devido a variações na própria demanda de transporte aéreo comercial regular de passageiros, que são influenciadas por fatores como a programação de voos, ou ainda devido ao pequeno volume de tráfego de aeronaves de carga, comum a aeroportos regionais. Considerar a análise sazonal dos volumes de tráfego aéreo é crucial para a modelagem preditiva, pois a relação entre os dados atuais e os dados históricos é utilizada para calcular os resultados, permitindo que o modelo se ajuste melhor às variações, resultando em previsões mais precisas.

Em relação aos métodos, Madhavan *et al.* (2020) comparam a modelagem econométrica clássica ao aprendizado de máquina quanto à eficiência e acurácia da previsão da demanda de carga aérea. Apesar da capacidade de operação de uma amostra de dados maior, os métodos de aprendizado de máquina apresentam as mesmas limitações sofridas pelos métodos econométricos, devido principalmente à influência de fatores externos, como políticas governamentais e o desenvolvimento de novos aeroportos. Dessa forma, as respostas favoráveis a cada método variam conforme o contexto de previsão adotado.

Para o contexto brasileiro, Dantas *et al.* (2017) investigaram a relação de longo prazo e a causalidade entre a combinação dos métodos *Bootstrap Aggregating (Bagging)* e suavização exponencial para prever a demanda aérea, utilizando séries temporais de dados disponibilizadas pela ANAC. Por sua vez, Sampaio *et al.* (2021) propuseram um modelo econométrico de regressão linear múltipla para estimar o potencial de demanda de passageiros em diversos estados do Nordeste do Brasil, como Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí. Em comparação ao modelo de Dantas *et al.* (2017), o de Sampaio *et al.* (2021) oferece maior especificidade, ao incluir variáveis socioeconômicas e *dummies* para as regiões de origem e destino dos voos, o que contribui para previsões mais precisas da demanda no cenário brasileiro. Contudo, como nenhum dos estudos considera esses aspectos, o presente estudo tem como objetivo prever a demanda de carga aérea no Brasil, além de examinar o impacto de variáveis econômicas, sociais, de mercado e padrões regionais específicos, com ênfase nos aeroportos selecionados do bloco Nordeste.

4 METODOLOGIA

4.1 Caracterização da pesquisa

A natureza da pesquisa realizada é quantitativa, uma vez que se baseia na construção de um banco de dados em painel mensal, permitindo a análise estatística das variáveis envolvidas na operação dos aeroportos.

A lógica de investigação é orientada pela teoria econômica da demanda derivada (Button, 2010), uma vez que, como discutem Magalhães *et al.* (2014), a demanda por serviços de transportes não é gerada diretamente por uma necessidade do produto, mas pela demanda por bens e serviços que necessitam ser movimentados. Assim, pode-se assumir que a demanda de carga aérea é derivada das necessidades econômicas e sociais de movimentação de bens em resposta a fatores como crescimento econômico, padrões de consumo, e até políticas ambientais da região analisada.

Logo, o modelo econométrico típico à demanda por transporte de carga é descrito por:

$$Q = f(Y, D, P) \quad (1)$$

No qual (Q) é a demanda por carga de transportes, (Y) representa a atividade econômica, (D) caracteriza a distância decorrida e (P) é o preço do serviço.

Quanto à abordagem do problema, a pesquisa foca na comparação entre a gestão dos aeroportos concedidos em um mesmo bloco, sob administração de uma mesma operadora. Assim, é buscado identificar padrões e tendências na operação para cada aeroporto.

A finalidade do estudo é desenvolver um modelo preditivo que permita estimar a demanda de voos cargueiros dos aeroportos membros do bloco Nordeste, considerando fatores de influência da demanda de carga, conforme apresentado na Equação (1).

Os procedimentos técnicos adotados incluem a aplicação de testes de diagnóstico para validar os pressupostos do modelo, como heterocedasticidade e autocorrelação, além da utilização de modelos de regressão com dados de contagem para prever a ocorrência de voos cargueiros. A pesquisa também enfatiza a importância de uma gestão integrada e estratégica das operações aeroportuárias, considerando as particularidades regionais e as mudanças no mercado, especialmente com o crescimento do *e-commerce*.

4.2 Seleção e coleta de dados

O estudo de caso selecionado concentra-se nos aeroportos do bloco Nordeste (NE) de concessões no Brasil. Esse bloco é composto por seis aeroportos estratégicos na Região Nordeste do Brasil: Recife-PE (SBRF), Aracaju-SE (SBAR), Campina Grande-PB (SBKG), Maceió-AL (SBMA), Juazeiro do Norte-PB (SBJU) e João Pessoa-PB (SBJP). A escolha desses aeroportos é relevante, pois o bloco NE representa o primeiro grupo de concessões aeroportuárias em blocos no Brasil, em 2019 (Brasil, 2019), oferecendo uma oportunidade única para medir e comparar a operação e a governança dos aeroportos sob a gestão da concessionária privada (AENA).

Para realizar uma análise abrangente, foram coletados dados mensais detalhados sobre diversos aspectos operacionais e econômicos dos aeroportos, conforme especificado na Equação (1). Esses dados foram então selecionados com base em análises de demanda presentes na literatura (ver Quadro 1), e suas informações são apresentadas a seguir na Quadro 2.

As variáveis são categorizadas de acordo com o tipo de informações coletadas, podendo ser divididas em três grupos: variáveis individuais, que se referem a informações específicas de cada aeroporto; variáveis gerais, que correspondem a dados nacionais; e variáveis derivadas, que são calculadas ou estimadas a partir das variáveis dos dois primeiros grupos ou que servem como especificadoras para um determinado efeito ou para cada aeroporto.

Quadro 2 – Descrição das variáveis selecionadas para o banco de dados, valores por aeroporto, nacionais e estimadas

Variável	Nome da Variável no Modelo	Fonte
Variáveis individuais – Dados para cada Aeroporto		
Decolagens de Cargueiros	DecolagensCARGUEIRO	ANAC (2024)
Decolagens de voos de Passageiros	DecolagensPAX	
Carga e Correio (Kg)	CARGO	
Yield médio (R\$)	YIELD	
Dummy início de operação da Concessão	CONCESSAO	AENA (2020)
Variáveis gerais – Dados nacionais		
PIB (Milhões)	PIB	FGV (2024)
Taxa de Câmbio Nominal (R\$/ U\$)	Cambio	
Exportações do Setor Aéreo do Brasil (U\$)	ExportacaoAviacao	COMEXSTAT (2024)
Importações do Setor Aéreo do Brasil (U\$)	ImportacaoAviacao	

Variável	Nome da Variável no Modelo	Fonte
Inflação Padronizada	InflacaoPadronizada	FGV (2024)
Produção industrial - fabricação de veículos automotores, reboques e carrocerias: índice de quantum (média 2022 = 100)	ProducaoIndustrialVeic	
Produção industrial - fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos: índice de quantum (média 2022 = 100)	ProducaoIndustrialFarmacos	
Produção industrial - indústria geral: índice de quantum (média 2022 = 100)	ProducaoIndustrialGeral	
Querosene da Aviação (R\$)	QAVRL	ANAC (2024)
Dummy período do COVID	COVID	
Variáveis Estimadas		
Decolagens Totais	DecolagensTOTAL	-
Dummy Aeroporto de Recife/PE - SBRF	DAEROPORTO-1	
Dummy Aeroporto de Maceió/AL – SBMO	DAEROPORTO-2	
Dummy Aeroporto de João Pessoa/PB – SBJP	DAEROPORTO-3	
Dummy Aeroporto de Aracaju/SE – SBAR	DAEROPORTO-4	
Dummy Aeroporto de Campina Grande/PB - SBKG	DAEROPORTO-5	
Dummy Aeroporto de Juazeiro do Norte/CE - SBJU	DAEROPORTO-6	
Balança Comercial – Setor Aéreo	BalancComercAero	
Taxa de Crescimento local (%)	Dif_PIB	
PIB sem variação sazonal	PIB_Destrendizado	
Tempo	Time	
Taxa de crescimento da inflação em transportes (%)	Dif_IPCA Transportes	

Fonte: Elaborado pelos autores.

As variáveis estimadas podem ser classificadas em variáveis que especificam um determinado efeito sobre a demanda ou que refletem o comportamento específico da demanda em cada aeroporto pertencente ao bloco Nordeste. Dentre as variáveis específicas a cada aeroporto, as variáveis dummy buscam introduzir a análise da capacidade preditiva do modelo para cada aeroporto do bloco, de modo que seja considerada a variação na acurácia dentro do grupo. Da mesma forma, as decolagens totais se referem a operação total de decolagens dos aeroportos, servindo como offset na avaliação de capacidade ou de eficiência na operação destes, sendo obtida conforme Equação (2).

$$Decolagens_{Totais} = Decolagens_{cargueiro} + Decolagens_{passageiros} \quad (2)$$

Por outro lado, dentre as variáveis estimadas de efeito, a velocidade de produção, dada pela taxa de crescimento da produção nacional, é obtida através de uma *proxy* da primeira diferença do Produto Interno Bruto (PIB). A aplicação da tendência do PIB visa minimizar os efeitos de deslocamento da curva de regressão gerada pelos altos valores da produção nacional. Do mesmo modo, o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) do setor de transportes é ajustado a partir da primeira diferença permitindo a análise do efeito da taxa de crescimento da inflação do setor de transportes na previsão da demanda de cargueiros, servindo como uma *proxy* da variação econômica específica ao setor doméstico de carga.

Além disso, questões de sazonalidade nos fatores econômicos são ainda verificadas nas variáveis. Logo, a aplicação da variável temporal (tempo) permite identificar o comportamento da demanda independente da variação sazonal das demais variáveis (principalmente as econômicas

como o PIB, inflação, câmbio, etc.). Dessa forma, o PIB é “destrendizado” à variação sazonal, permitindo a análise da variação temporal da demanda e não do crescimento da produção, ou seja, os efeitos de uma *proxy* da produção ou de crescimento econômico não serão avaliados pelo modelo, apenas o comportamento sazonal da demanda prevista, caso exista.

Por fim, a balança comercial (*BC*), Equação (3), serve como indicador da atividade econômica nacional em relação ao comércio internacional de carga aérea. Essa variável permite indicar, a partir do balanço entre exportações (*E*) e importações (*I*) do setor aéreo nacional, qual a estrutura adotada e quais os potenciais de crescimento.

$$BC = E - I \quad (3)$$

Dessa forma, a análise dos dados coletados buscou identificar a relação causal entre a variável dependente selecionada (o número de decolagens de cargueiros) e os fatores explicativos da demanda por transportes, Equação (1).

Com base nesses dados, foi construído um banco de dados em painel, que consiste em uma série de dados mensais, permitindo analisar as principais mudanças na operação dos aeroportos do bloco ao longo do tempo, além de comparar as diferentes variáveis selecionadas.

O banco de dados construído permite ainda a aplicação de técnicas estatísticas e econômicas avançadas para avaliar o desempenho dos aeroportos sob diferentes modelos de governança e gerenciamento, identificando padrões e tendências na operação dos aeroportos e como estes influenciaram o desempenho dos aeroportos do bloco.

4.3 Seleção dos métodos de previsão

A construção de um modelo de previsão para o banco de dados em painel mensal requer uma abordagem sistemática e fundamentada na teoria econômica e estatística. Dessa forma, a seleção do método ideal de previsão se baseia na comparação entre a análise da relação linear entre as variáveis com uma distribuição aleatória da variável que segue a distribuição de Poisson.

Os modelos selecionados para a construção da predição foram avaliados a partir de testes de diagnóstico, como heterocedasticidade, autocorrelação e multicolinearidade entre as variáveis selecionadas. Além desses, testes de especificação foram empregados para verificar a significância dos efeitos específicos.

Assim, dois métodos foram selecionados para a construção dos modelos: o primeiro é um método de regressão linear por Mínimos Quadrados Ponderados (*Weighted Least Squares – WLS*), e o segundo é um método de variável dependente limitada do tipo contagem, que segue uma distribuição de Poisson. A comparação entre os métodos econométricos clássicos permitirá avaliar as suas adequações quanto à especificidade da previsão realizada, conforme indicado por Madhavan *et al.* (2020).

Os métodos serão testados para que a resposta com maior significância estatística e melhor capacidade preditiva indique o modelo mais adequado para prever a demanda de cargueiros nos aeroportos do bloco Nordeste. As estatísticas descritivas das saídas de cada modelo serão analisadas, juntamente com a variação observada na variável dependente.

1.1.1. Modelos de Regressão por Mínimos Quadrados Ponderados (*WLS*)

Ao serem comparados os modelos de efeitos fixos e aleatórios para os estimadores fixos ou aleatórios, o teste de Hausman não rejeita a hipótese nula de que as estimativas GLS são consis-

tentes (valor p de 0,497733), indicando que não há evidência de que o modelo de efeitos aleatórios seja inconsistente.

Contudo, a heterocedasticidade do modelo aleatório (MRA) não é significativa, uma vez que o Teste de Breusch-Pagan rejeita a hipótese nula de que a variância do erro de unidade específica é zero.

Dessa forma, o método de previsão selecionado foi o modelo de Mínimos Quadrados Ponderados (WLS), o qual atribui pesos diferentes a cada observação na amostra, com base na variância de erro associada a cada uma delas. O objetivo do WLS é minimizar a soma ponderada dos quadrados dos resíduos, em que os pesos são definidos de forma inversamente proporcional à variância de erro das observações. Isso significa que observações com maior variância de erro recebem menos peso, enquanto aquelas com menor variância de erro recebem mais peso, sendo útil quando há heterocedasticidade (Gujarati; Porter, 2008). Para a previsão de demanda por cargueiros em aeroportos, em que certas observações podem ter uma confiabilidade maior do que outras, a escolha da ponderação dos pesos permite distribuição de maior importância para as observações com menor incerteza e menor variabilidade nos erros.

A fórmula para o WLS (4) considera que a soma dos quadrados dos resíduos (SQR) é igual ao somatório dos pesos atribuídos às variáveis independentes (ω_i), os quais são inversamente proporcionais à sua variância de erro (5), em razão do quadrado da diferença entre os valores observados (y_i) e os previstos pelo modelo (Y_i).

$$SQR = \sum_{i=1}^n \omega_i (y_i - Y_i)^2 \quad (4)$$

$$\omega_i = 1/\sigma_i^2 \quad (5)$$

1.1.2 Método de regressão em variável dependente limitada do tipo contagem com distribuição de Poisson

O segundo método aplicado assume que a natureza das variáveis dependentes de um modelo de previsão de demanda aérea é de contagem, uma vez que o número de decolagens de cargueiros se enquadra nos critérios apresentados por Wooldridge (2006): são valores inteiros não negativos, correspondendo à ocorrência de um determinado número de eventos em um intervalo de tempo específico. Assim, o modelo gerado segue uma formulação que prevê o número de voos cargueiros em n aeroportos, Equação (6).

$$Y_i = \text{Poisson}(\lambda_i) \quad (6)$$

$$\lambda_i = e^{(\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki})} \quad (7)$$

Onde Y_i representa o número de voos cargueiros no aeroporto i , e (λ_i) é a taxa média de voos cargueiros esperados, que pode ser modelada como uma função das variáveis independentes. Aqui, X_{ki} são as variáveis independentes que podem incluir fatores econômicos e de transporte, e os coeficientes β_k representam o impacto de cada variável independente na taxa de voos cargueiros em cada aeroporto k .

A escolha do modelo de Poisson é justificada pela natureza discreta da variável dependente, que assume apenas valores inteiros não negativos, correspondendo à ocorrência de um número de voos em um determinado intervalo de tempo.

5 RESULTADOS

As estatísticas descritivas de todas as variáveis são apresentadas na Tabela 1. Os dados indicam que, para as variáveis gerais, o PIB registra um crescimento ao longo do intervalo do painel com variação sempre positiva, como apresentado nos valores mínimos da taxa de crescimento local (*dif_PIB*).

Tabela 1 – Estatísticas descritivas das variáveis selecionadas para o banco de dados, valores por aeroporto e nacionais

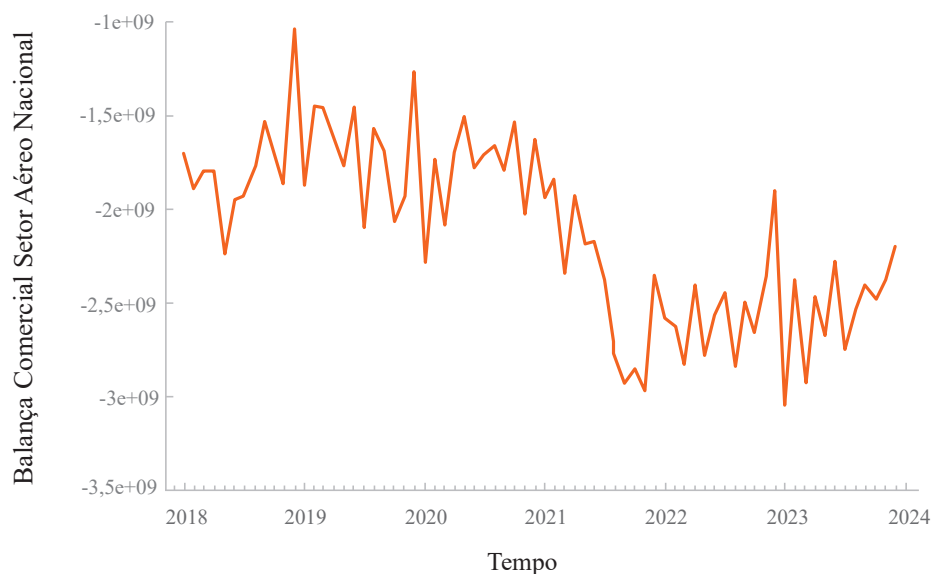
Nome da Variável no Modelo	Unidade	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio-Padrão	C.V.
Variáveis individuais – Dados para cada Aeroporto							
DecolagensCARGUEIRO	-	15,227	0,0	0,0	142,0	31,472	2,067
DecolagensPAX	-	698,91	365,0	0,0	3492,0	924,41	1,323
CARGO	Kg	3,315e+5	36129	0,0	2,517e+6	6,677e+5	2,014
YIELD	R\$/Km	0,381	0,375	0,169	3,0	0,149	0,390
CONCESSAO	-	0,655	1,0	0,0	1,0	0,476	0,726
Variáveis gerais – Dados nacionais							
PIB	Milhões (R\$)	7,215e+5	6,879e+5	5,436e+5	9,533e+5	1,249e+5	0,173
Cambio	US\$/R\$	4,719	4,975	3,210	5,650	0,715	0,151
ExportacaoAviacao	US\$	1,281e+9	1,289e+9	7,263e+8	1,995e+9	2,253e+8	0,179
ImportacaoAviacao	US\$	3,40e+9	3,386e+9	2,335e+9	4,393e+9	5,062e+8	0,1489
InflacaoPadronizada	%	0,276	0,250	-0,420	1,00	0,272	0,988
ProducaoIndustrialVeic	Índice de quantum (média 2022 = 100)	98,771	98,840	9,390	131,29	19,175	0,194
ProducaoIndustrialFarmacos		102,05	104,28	62,831	118,68	11,937	0,117
ProducaoIndustrialGeral		100,28	101,59	70,250	114,46	8,326	0,083
QAVRL	R\$/L	3,033	2,460	1,300	5,810	1,205	0,397
COVID	-	0,222	0,0	0,0	1,00	0,416	1,873
Variáveis Estimadas							
DecolagensTOTAL	-	730,43	362,0	1,0	3652,0	984,99	1,348
BalancComercAero	-	4,706e+8	0,222	-0,106	-0,867	-2,92e+9	-1,449e+9
Dif_PIB	%	25912	4,891	0,431	1,502	-30965	43329
PIB_Destrendizado	R\$	35912	9,470e+14	-0,714	0,201	-57119	47702
Dif_IPCA_Transportes	%	1,379	59,356	-0,762	2,207	-1,760	2,210

Fonte: Elaborado pelos autores.

A balança comercial do setor aéreo predominante negativa, Figura 1, demonstra uma tendência de utilização do setor para importações de bens; essa realidade condiz com a hipótese de Lotti e Caetano (2018) e Alexander e Merket (2021), uma vez que o tempo é um fator essencial do transporte aéreo, resultando na escolha do aeroporto frente ao fretamento rodoviário convencional, salientando ainda que a eficiência das operações alfandegárias no aeroporto é um fator de grande peso na decisão dos exportadores.

A Figura 2 mostra a relação entre variáveis econômicas — taxa de câmbio nominal (a), preço do querosene de aviação (b), PIB (c) e inflação padronizada (d) — e a movimentação de voos cargueiros nos aeroportos do bloco Nordeste. Embora seja possível observar uma relação positiva entre essas variáveis econômicas e a demanda por cargueiros (Akinyemi, 2023; Anguita; Olariaga, 2023; Karunathilake; Fernando, 2024), a alta variância na operação de cargueiros entre os aeroportos do bloco (ver quadro 2) gera distorções nas relações lineares. Além disso, as unidades elevadas na medida do PIB, associadas à sua sazonalidade, podem contribuir para variações na previsão de demanda.

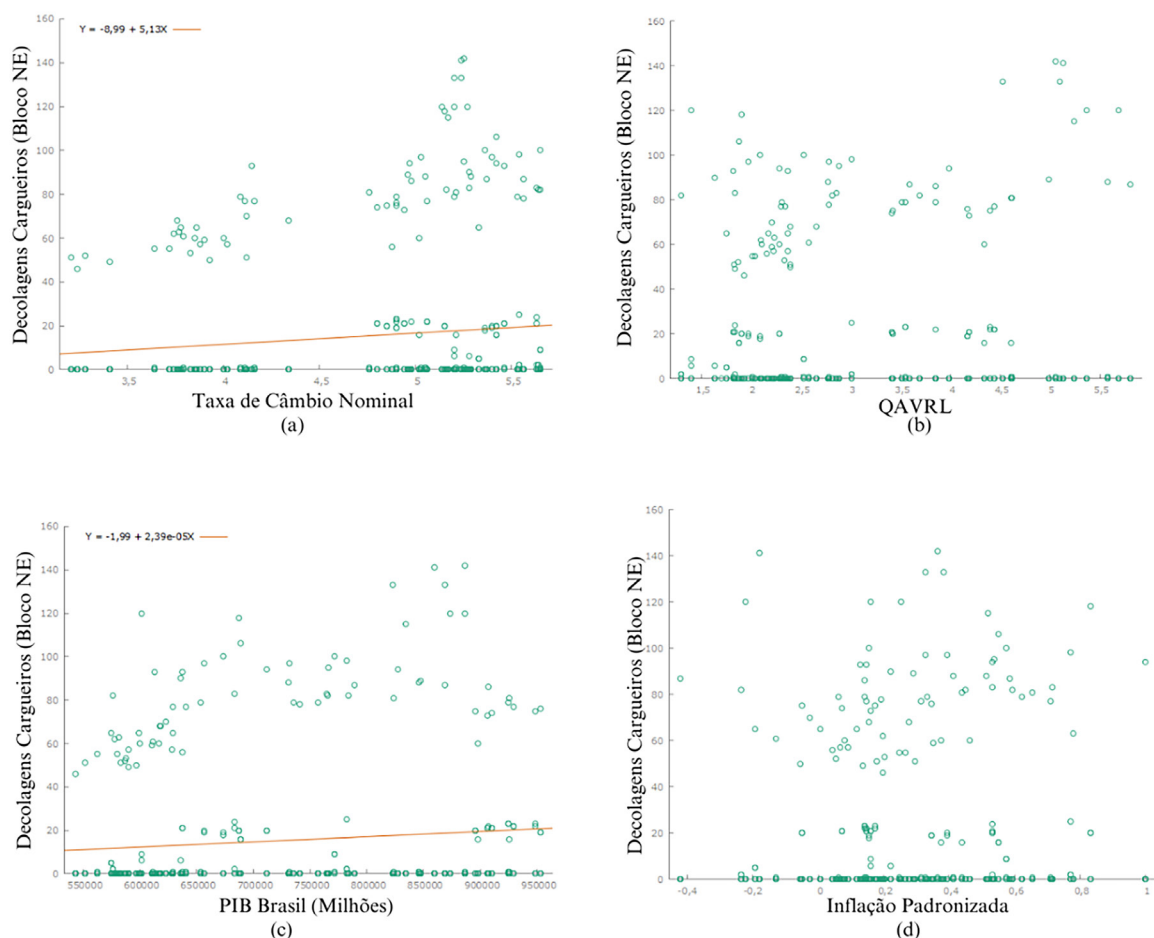
Figura 1 – Balança comercial do setor aéreo nacional



Fonte: Elaborado pelos autores.

Adicionalmente, os custos operacionais dos aeroportos e, conseqüentemente, as decolagens de cargueiros podem ser impactadas pela variação da taxa de inflação e pelo principal insumo na operação de um voo, o combustível (Chao; Hsu, 2014).

Figura 2 – Relações entre as decolagens de cargueiros nos aeroportos do bloco NE e as variáveis econômicas nacionais



Fonte: Elaborado pelos autores.

Vale salientar também que a variância nas operações de cargueiros dos aeroportos do bloco pode ser observada na correlação entre as variáveis específicas. A média de decolagens de cargueiros é de 15,227, com um mínimo de 0,0 e um máximo de 365,0, indicando grande variação na atividade entre os aeroportos (Figura 3). Somente o aeroporto SBRF apresenta operação regular de cargueiros, enquanto em outros dois aeroportos, SBMO e SBAR, ocorrem picos de demanda durante o período pandêmico, com o transporte principalmente de produtos farmacêuticos. Isso sugere uma movimentação governamental local voltada ao combate à pandemia de Covid-19.

Figura 3 – Relações de decolagens Aeroportos Bloco Nordeste



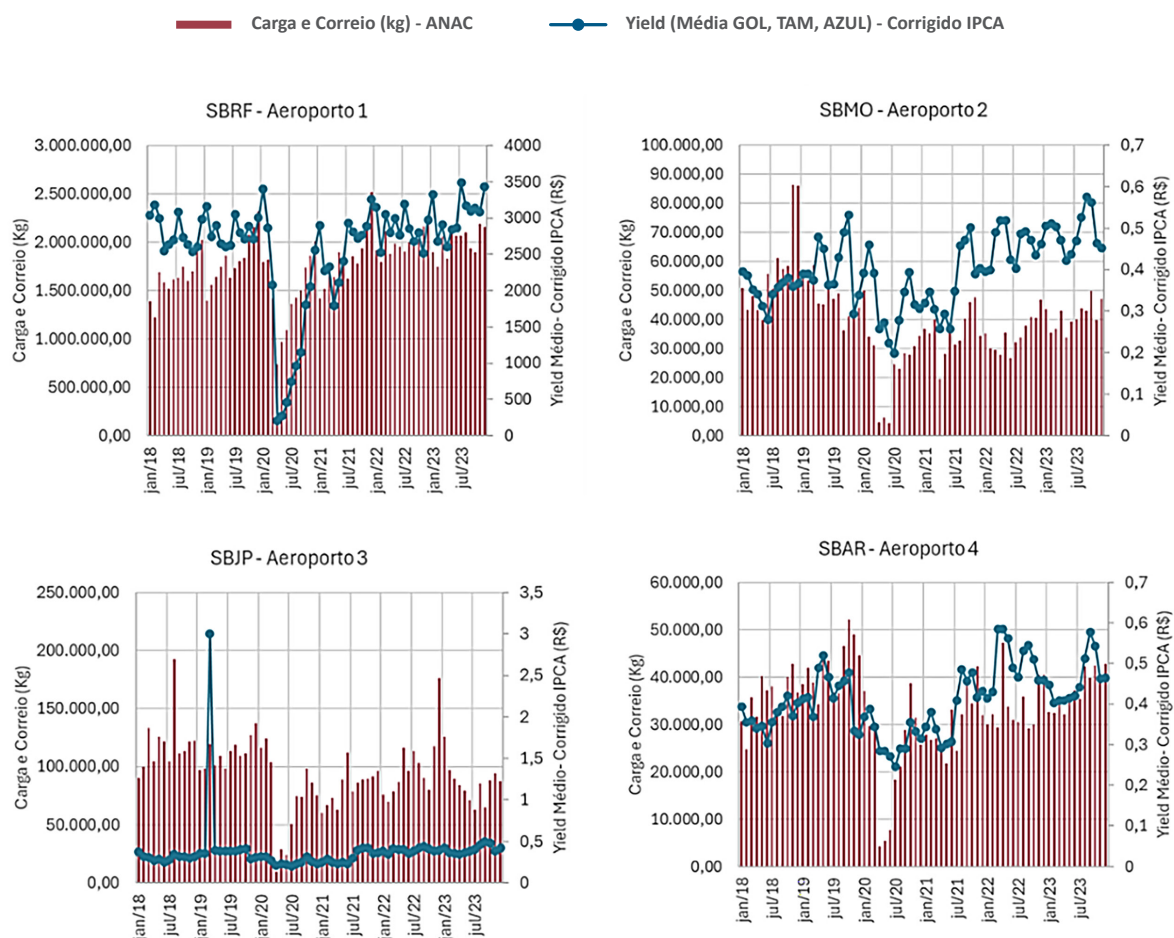
Fonte: Elaborado pelos autores.

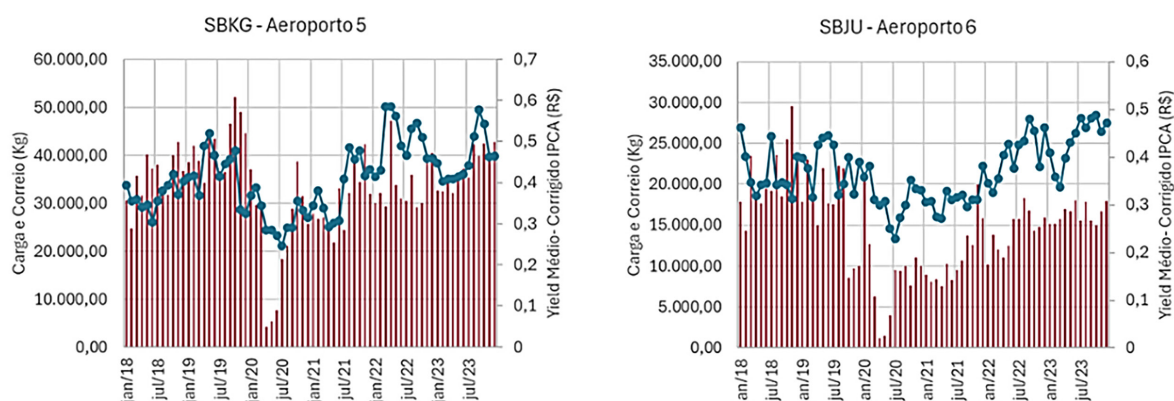
Os demais aeroportos, SBJP, SBKG e SBJU, são aeroportos regionais menores, onde a demanda por cargueiros é praticamente inexistente ao longo de todo o período analisado. No entanto, no caso de SBJP, observou-se um aumento significativo nas operações de cargueiros nos últimos anos de gestão pela AENA, que iniciou em fevereiro de 2020. Esse crescimento foi impulsionado principalmente por operações domésticas, focadas em produtos da indústria geral, conforme dados da Secretaria da Aviação Civil através do Portal Hórus (Hórus, 2024), sugerindo uma possível integração do comércio eletrônico na região do estado da Paraíba, onde o aeroporto está localizado.

Esse resultado levanta a hipótese de que, para os aeroportos do bloco que não têm operações regulares de cargueiros, existe uma possibilidade rentável de desenvolver tais operações. Contudo, ao se analisar a relação entre o *yield* médio das operações regulares de voos domésticos de passageiros nesses aeroportos e a carga doméstica transportada, observa-se uma correlação, indicando a predominância na operação da carga transportada no porão inferior da aeronave comercial de passageiros, chamado de *belly hold*, Figura 4.

Com um *yield* médio para as operações domésticas de 0,381 e um desvio-padrão de 0,149, sugere-se que a rentabilidade dessas operações pode variar consideravelmente entre os aeroportos. Observa-se, por exemplo, que em SBJP, onde a AENA iniciou operações regulares de cargueiros, a variação do *yield* não acompanha diretamente o crescimento na carga transportada nos últimos meses do período analisado.

Figura 4 – Relações de Carga e Yield Aeroportos Bloco NE





Fonte: Elaborado pelos autores.

Dessa forma, o conjunto de variáveis selecionado foi testado em configurações de modelos de predição distintos, utilizando os métodos econométricos selecionados, WLS e modelo de contagem com distribuição de Poisson. Os modelos econométricos propostos seguiram uma natureza de demanda, em que a demanda por transporte de carga (Q) é descrita pela função (1). As informações sobre o preço do serviço são obtidas por *proxys*, como a taxa de câmbio nominal e a taxa de crescimento da inflação em transportes, que são variáveis gerais e estimadas no modelo.

Além disso, as características de distância são observadas pela especificidade de cada aeroporto, utilizando *dummies* e variáveis individuais, como as decolagens de cargueiros e o *yield* médio.

5.1 Modelos de previsão da demanda por cargueiros

Os resultados dos modelos testados são apresentados na Tabela 2. Foram construídos três modelos, o primeiro utilizando o método de Mínimos Quadrados Ponderados (WLS), e os demais utilizando o método de contagem com distribuição de Poisson.

De imediato, o modelo WLS apresenta o maior coeficiente de determinação ajustado. Além disso, o coeficiente negativo na maioria das variáveis explicativas indica uma relação inversamente proporcional entre o custo de operação de voos cargueiros em todos os aeroportos do bloco (QAVRL). Enquanto isso, todos os aeroportos menores, em comparação a SBRF, mostram tendências negativas na geração de voos cargueiros. Já o PIB, como *proxy* econômica direta, sugere uma maior probabilidade de formação de demanda por cargueiros no bloco à medida que ocorre crescimento na produção doméstica brasileira.

Contudo, apesar da alta significância estatística das variáveis selecionadas pelo modelo WLS e do ajuste dos pesos com base nas variâncias dos erros por unidade — o que permite que observações com menor variância exerçam maior influência na estimativa dos parâmetros (Wooldridge, 2006) e, consequentemente, uma regressão com dados heterogêneos representativos da variação na demanda por cargueiros entre os aeroportos do bloco —, o modelo rejeita a hipótese nula de distribuição normal dos erros, com p-valor de 5,85734e-28. Isso pode indicar que as suposições do modelo não estão sendo atendidas, o que pode comprometer a validade das inferências estatísticas, pois a distribuição normal dos erros é fundamental para garantir a eficiência das estimativas dos parâmetros e a validade dos testes de hipóteses (Gujarati; Porter, 2008).

Além disso, os modelos de contagem oferecem várias vantagens em relação aos modelos de Mínimos Quadrados Ponderados (WLS), especialmente para dados inteiros positivos. Segundo Ohi e Kim (2020), os modelos de contagem são projetados para lidar com a natureza discreta desses dados, que frequentemente apresentam uma quantidade excessiva de zeros. Isso é relevante, pois a presença de zeros excessivos viola as suposições de distribuição normal dos erros nos modelos WLS, que assumem que a variável dependente é contínua e normalmente distribuída.

Tabela 2 – Modelos de previsão da demanda de cargueiros nos aeroportos do Bloco NE

Variável	Modelos de Previsão da Demanda por Cargueiros: Aeroportos do Bloco NE					
	WLS	p-valor	Contagem (Poisson) 1	p-valor	Contagem (Poisson) 2	p-valor
Constante	71,4910	6,20e-90 ***	-6,267	4,51e-160 ***	-6,06244	2,25e-229 ***
QAVRL	-1,63092	8,33e-7 ***	-	-	-	-
DAEROPORTO-2	-76,4722	6,04e-114 ***	-1,67924	5,54e-131 ***	-1,31573	1,25e-125 ***
DAEROPORTO-3	-78,4167	1,45e-120 ***	-2,18561	7,30e-84 ***	-1,32907	3,99e-79 ***
DAEROPORTO-4	-79,0039	4,18e-119 ***	-1,35695	4,85e-66 ***	-1,43714	1,81e-74 ***
DAEROPORTO-5	-81,3056	1,83e-127 ***	-22,0608	0,9965	-22,1286	0,9963
DAEROPORTO-6	-81,2778	1,98e-127 ***	-4,99992	1,55e-12 ***	-5,09687	5,73e-13 ***
PIB	2,05E-05	2,20e-10 ***	-	-	-3,57548e-07	0,0230 **
Cambio	-	-	0,340452	8,59e-17 ***	0,523132	1,10e-91 ***
BalancaComercAero	-	-	3,33511e-10	8,59e-17 ***	3,59443e-10	2,04e-21 ***
ProducaoIndustrialVeic	-	-	-0,0142936	4,63e-22 ***	-0,0180278	7,44e-52 ***
ProducaoIndustrialFarmacos	-	-	0,0132842	9,76e-20 ***	0,0115149	1,37e-22 ***
ProducaoIndustrialGeral	-	-	0,0173108	3,33e-9 ***	0,0168533	2,92e-11 ***
Time	-	-	0,00526171	0,0011 ***	-	-
Dif_PIB	-	-	1,42100e-06	0,0273 **	-	-
Dif_IPCA_Transportes	-	-	0,0475760	4,61e-6 ***	-	-
PIB_Destrendizado	-	-	-5,11985e-6	2,12e-15 ***	-	-
n (número de observações)		432		390		432
R ² ajustado		0,7530		0,6242		0,5359
Log da Verossimilhança		-563,4		-1173		-1563

Fonte: Elaborado pelos autores.

Legenda:

* significativo ao nível de 10 por cento

** significativo ao nível de 5 por cento

*** significativo ao nível de 1 por cento

Dessa forma, foram construídos dois modelos aplicando a metodologia de contagem. A distribuição de Poisson é assumida aos modelos, pois o número de eventos é grande e a probabilidade de ocorrência de cada evento é pequena (Wooldridge, 2006).

O primeiro modelo de contagem com distribuição de Poisson, apresentado na Tabela 2, possui um R² ajustado de 0,6242, indicando que 62,42% da variabilidade nas decolagens de cargueiros são explicados pelas variáveis independentes incluídas, porém ainda sendo um coeficiente de determinação inferior ao do modelo WLS. No entanto, as relações da atividade econômica são

analisadas nesse modelo considerando as variáveis estimadas, como as taxas de crescimento da produção e da inflação do setor de transportes (dif_PIB e $Dif_IPCA_Transportes$, respectivamente). Em ambas as variáveis, a relação é positiva em relação à previsão da demanda, comportamento já indicado por Akinyemi (2023) e Anguita e Olariaga (2023). Contudo, ao verificar a influência do PIB "destrendizado" — buscando eliminar a influência sazonal do PIB e focar nas variações que podem impactar a demanda de forma mais direta — observa-se que a relação entre as variáveis econômicas e a demanda por serviços de transporte se torna inversamente proporcional.

A produção industrial de produtos farmacêuticos e da indústria geral, por sua vez, é não apenas diretamente proporcional, mas também de maior impacto e significância. Embora o coeficiente para a produção da indústria automobilística no Brasil seja negativo, os fatores de produção industrial, conforme defendido por Alexander e Merket (2021) e Karunathilake e Fernando (2024), influenciam a distribuição doméstica de carga no Brasil. Isso levanta a hipótese de que o setor cargueiro esteja mais voltado à indústria do que ao consumo individual na Região.

Em relação à demanda internacional de carga, o coeficiente positivo para uma balança com saldo comercial negativo pode indicar uma utilização do setor cargueiro aéreo para distribuição de importações na Região (Ishutkina; Hansman, 2009), especificamente para os estados aos quais pertencem os aeroportos do bloco.

As dummies para os aeroportos mostram que a maioria dos aeroportos do bloco Nordeste tem um impacto negativo significativo nas decolagens em relação a SBRF, com p-valores muito baixos. Contudo, SBKG não é estatisticamente significativo (p-valor de 0,9965), uma vez que não existe movimentação de cargueiros para o aeroporto, Figura 3.

O segundo modelo gerado também aplica o método de contagem com distribuição Poisson, porém desconsiderando as variáveis derivadas do PIB. A variável tempo não apresenta uma resposta significativa ao comportamento da demanda de cargueiros, uma vez que efeitos indiretos como políticas públicas ou específicas à gestão da concessionária podem afetar a demanda de forma não linear, como no caso da demanda em SBJP, Figura 3.

Assim, preza-se por um modelo parcimonioso, em que a relação da atividade econômica é medida por uma única variável, o PIB, que apresenta valor negativo. Com o coeficiente negativo, pode-se indicar que, à medida que o PIB nominal aumenta, a demanda por decolagens de cargueiros diminui. Isso poderia ocorrer em situações em que, por exemplo, um aumento no PIB nominal não se traduz em um aumento proporcional na demanda por transporte aéreo de carga.

Em alguns casos, como o do Chile apresentado por Vega (2008), sugere-se que a demanda por transporte aéreo de carga é suscetível a choques de demanda exógenos, como recessões econômicas, que podem não se traduzir em um aumento proporcional na demanda por serviços aéreos, mesmo com um PIB crescente. Portanto, a eficiência do setor aéreo de carga e a dinâmica da demanda podem não acompanhar diretamente o crescimento do PIB nominal.

Entretanto, variáveis *proxy* da influência do comércio internacional na operação de cargueiros na Região indicam uma resposta positiva, demonstrando novamente uma resposta direta da demanda de escoamento de importações de carga aérea para o bloco.

As dummies específicas a cada aeroporto se assemelham ao segundo modelo, de modo que todos, com exceção de SBKG, são significativos estatisticamente, porém, com efeito negativo em relação ao único aeroporto com movimentação regular de cargueiros no bloco, SBRF. A comparação dos aeroportos proporcionada pelas dummies individuais indica que, tendo o aeroporto de Recife como hub concentrador de operações para o bloco, a resposta dos demais aeroportos pode ser um indicativo da necessidade de operação conjunta ao aeroporto âncora do bloco. Essa hipótese indica a possibilidade de desempenho das atividades de distribuição das rotas cargueiras para aeroportos menores, como indicado por Babagolzadeh *et al.* (2022) e Boonekamp e Burghouwt (2017).

Além disso, em relação à colinearidade, o teste dos Fatores de Inflacionamento da Variância (VIF) não apresenta valores que indiquem colinearidade entre as variáveis selecionadas em nenhum dos modelos construídos.

Desse modo, os modelos foram analisados a partir da comparação entre as estatísticas descritivas das previsões de teste realizadas, Tabela 3. Entre os modelos, apenas o modelo de contagem 1 não atinge a média da variável dependente. No entanto, a mediana da variável dependente é 0, o que pode indicar que a maioria das observações está concentrada em valores baixos, mas as medianas dos modelos de contagem 2 e WLS são significativamente maiores, sugerindo que esses modelos podem estar superestimando a centralidade dos dados.

Tabela 3 – Estatísticas descritivas das previsões dos modelos testados em comparação à variável dependente (Decolagens de cargueiros)

Modelo	Média	Mediana	D.P.	Mín	Máx
Decolagens Cargueiros (dados reais)	15,23	0,0	31,47	0,0	142,0
Modelo WLS	15,23	2,518	29,66	-1,840	84,62
Modelo Contagem 1 (Poisson)	14,81	1,624	31,96	4,518e-11	149,5
Modelo Contagem 2 (Poisson)	15,23	2,397	31,51	4,149e-11	143,3

Fonte: Elaborado pelos autores.

Por fim, a dispersão do desvio-padrão em relação à média, assim como a proximidade dos valores mínimos e máximos aos observados para a variável descrita, indica que o modelo de contagem parcimonioso, que utiliza o PIB nominal em vez dos fatores estimados, configura o melhor formato para a previsão da demanda de cargueiros no bloco de aeroportos do Nordeste.

A proximidade da resposta predita à realidade do modelo indica que a construção de um modelo de predição de voos cargueiros em blocos de aeroportos do Brasil aponta para a necessidade de adaptação dos modelos de concessão utilizados, devendo ser consideradas não apenas a demanda de passageiros, mas também as operações de carga no desenvolvimento das infraestruturas dos aeroportos. Além disso, a flexibilidade dos modelos é fundamental para acompanhar as mudanças no mercado, particularmente o incremento do *e-commerce* e as demandas logísticas associadas. Os resultados enfatizam a capacidade dos aeroportos regionais em desenvolver sua própria demanda de carga, reforçando a importância de uma gestão integrada e estratégica das operações aeroportuárias.

Dessa maneira, pode ser levantada a hipótese de que, diferentemente do estabelecido no contrato de concessão, manutenção e expansão dos aeroportos integrantes do bloco Nordeste (ANAC, 2019), os fatores desencadeadores de investimentos em infraestrutura desses aeroportos devem considerar, além dos movimentos de aeronaves e dos passageiros no horário de pico, também as operações de carga. Isso porque, dentro do grupo, apenas SBRF conta com um terminal de cargas, enquanto as operações nos demais aeroportos não estão focadas no desenvolvimento da infraestrutura para carga.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo principal desenvolver um modelo preditivo para estimar a demanda de carga aérea nos aeroportos concessionados do bloco Nordeste do Brasil. A pesquisa se baseou na construção de um banco de dados em painel, que permitiu a análise das variáveis operacionais e econômicas ao longo do tempo. Através da aplicação de métodos econométricos, como a regressão por Mínimos Quadrados Ponderados (WLS) e modelos de contagem com distri-

buição de Poisson, foi possível identificar padrões e tendências que influenciam a demanda por voos cargueiros na Região.

Os principais resultados indicaram que a demanda por carga aérea é significativamente afetada por fatores econômicos, como o PIB e a conectividade entre os aeroportos. O modelo de contagem com distribuição de Poisson se destacou por sua capacidade preditiva, demonstrando que a variância de erro das observações é um aspecto crucial a ser considerado na análise. Além disso, a comparação entre os modelos de contagem revelou que, embora alguns modelos possam superestimar a centralidade dos dados, a utilização do PIB nominal se mostrou eficaz para a previsão da demanda de cargueiros para os aeroportos do bloco Nordeste.

A hipótese da pesquisa, que buscava entender a dinâmica da demanda de carga aérea em relação a variáveis econômicas e operacionais, foi atendida em parte. Os resultados sugerem que, para além da demanda de passageiros, é fundamental considerar as operações de carga na formulação de políticas e na gestão dos aeroportos. A análise específica para cada aeroporto revelou que o aeroporto de Recife (SBRF) atua como um *hub* concentrador, indicando a necessidade de uma operação conjunta com os demais aeroportos do bloco.

Além disso, a pesquisa enfatiza a importância de uma gestão integrada e estratégica das operações aeroportuárias, especialmente em um contexto de crescente e-commerce e mudanças nas demandas logísticas. A flexibilidade dos modelos de concessão é essencial para acompanhar essas transformações, garantindo que os aeroportos possam se adaptar às novas realidades do mercado. A análise dos dados sugere que os aeroportos regionais têm potencial para desenvolver sua própria demanda de carga, o que reforça a necessidade de investimentos em infraestrutura.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a expansão da pesquisa para incluir uma análise mais detalhada dos fatores determinantes da demanda por carga aérea, bem como o papel do transporte aéreo regional na logística brasileira. A resposta negativa do PIB em ambos os modelos de contagem indica uma relação econômica exógena que deve ser investigada em estudos futuros. Assim, é fundamental que as políticas de investimento em infraestrutura aeroportuária considerem não apenas os movimentos de passageiros, mas também as operações de carga, a fim de promover um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável da aviação no Brasil.

REFERÊNCIAS

AENA - AEROPORTOS DO NORDESTE DO BRASIL S.A. Histórico dos Aeroportos do Bloco Nordeste. **Portal da Concessionária**. 2020. Acesso em 31 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://www.aenabrasil.com.br/pt/aeroportos/aeroporto-internacional-do-recife-guararapes-gilberto-freyre/historico.html>.

AKINYEMI, Y. C. Air cargo demand in Africa: Application of cointegration and error correction modelling techniques. **Journal of Air Transport Management**, 109, p. 1-12, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102399>.

ALEXANDER, D. W.; MERKERT, R. Applications of gravity models to evaluate and forecast. **Transport Policy**, 104, p. 52-62, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.01.004>.

ANAC - AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Contrato de Concessão para Ampliação, Manutenção e Exploração dos Aeroportos Integrantes do Bloco Nordeste (até **TA n.003.2023**). Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil, 2023.

_____. Dados e estatísticas da aviação regional. **Portal Digital da ANAC**, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/dados-estatisticos/dados-estatisticos>. Acesso em: 31 jan. 2023.

- ANGUITA, J. G. M.; OLARIAGA, O. D.. Air cargo transport demand forecasting using ConvLSTM2D, an artificial neural network architecture approach. **Case Studies on Transport Policy**, v. 12, p. 1-12, 2023. doi: 10.1016/j.cstp.2023.101009.
- BABAGOLZADEH, M.; ZHANG, Y.; ABBASI, B.; SHRESTHA, A.; ZHANG, A. Promoting Australian regional airports with subsidy schemes: Optimised downstream logistics using vehicle routing problem. **Transport Policy**, v.128, p. 38-51, 2022. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.09.001>. Acesso em: 15 jan. 2023.
- BAIER, F.; BERSTER, P.; GELHAUSEN, M. Global cargo gravitation model: airports matter for forecasts. **International Economics and Economic Policy**, v. 19, p. 219-238, 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s10368-021-00525-2>. Acesso em: 15 jan. 2023.
- BOMBELLI, A.; SANTOS, B. F.; TAVASSZY, L. Analysis of the air cargo transport network using a complex network theory perspective. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 138, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101959>. Acesso em: 15 jan. 2023.
- BOONEKAMP, T.; BURGHOUWT, G. Measuring connectivity in the air freight industry. **Journal of Air Transport Management**, v. 61, p. 81-94, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.05.003>.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Contrato de concessão para ampliação, manutenção e exploração dos aeroportos integrantes do Aeroporto de São Gonçalo do Amarante**. Brasília: ANAC, 2017.
- _____. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Contrato de concessão para ampliação, manutenção e exploração dos aeroportos integrantes do Bloco Nordeste** (Texto Compilado até o Termo Aditivo nº 003/2023). Brasília: ANAC, 2019.
- BUTTON, K. **Transport economics**. Edward Elgar Publishing, 2010.
- CHAO, C. C.; HSU, C.W. Cost analysis of air cargo transport and effects of fluctuations in fuel price. **Journal of Air Transport Management**, v. 35, p. 51-56, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2013.11.010>.
- CHU, H.C. Exploring preference heterogeneity of air freight forwarders in the choices of carries and routes. **Journal of Air Transport Management**, v. 37, p. 45-52, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.02.002>.
- CONWAY, P. **Airline Business**. London, v. 24, n.10, p. 78-81, 2008.
- DANTAS, T. M.; OLIVEIRA, F. L. C.; REPOLHO, H. M. V. Air transportation demand forecast through Bagging Holt Winters methods. **Journal of Air Transport Management**, v. 59, p.116-123, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.12.006>.
- SILVA, F. G. F.; RODRIGUES, J. A. S.; FALCÃO, V. A. Analysis of efficiency gains of airports awarded in the first group of Brazilian auctions. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 33., 2019, Balneário Camboriú. **Anais...** Balneário Camboriu, Brazil, 2019. Acesso em: 15 jan. 2023.
- DOMINGOS, M. C. F.; FALCÃO, V. A.; SILVA, F. G. F. Analysis of the Factors that Influence Airport Choice in Northeast Brazil. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 34., 2020, Digital. **Anais...** Digital: ANPET, 2020.

FALCÃO, V. A.; DA SILVA, F. G.; OLIVEIRA, F. H.; NEGRI, N. A.; ANDRADE, M. O.; BRASILEIRO, A.; . MACÁRIO, R.. Scientific investigations in air transport about Brazil: A bibliometric review. **Case Studies on Transport Policy**, v. 9, n. 4, p. 1912-1921, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.10.012>.

FALCÃO, V. A.; QUEIROZ JÚNIOR, H. S.; MENDES, L. T. B.; DA SILVA, F. G. F. Impacto da pandemia da COVID-19 na eficiência dos aeroportos brasileiros: aplicação de análise envoltória de dados e regressão tobit. **Revista Transporte y Territorio**, n. 27, p. 72-102, 2022. DOI: <https://doi.org/10.34096/rtt.i27.12217>.

GALDIANO, L.; FALCAO, V. A.; SILVA, F. G. F. Systematic Review Airport Concessions and the Brazilian Case. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TRANSPORTE AÉREO**, 28., 2019, Brasília. Anais... Brasília: SBTA, 2019.

GRAHAM, P. A. Airport privatisation: A successful journey? **Journal of Air Transport Management**, v. 89, 101930, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101930>.

GUJARATI, D.; PORTER, C. Basic Econometrics (5th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education, 2008.

IATA. IATA Cargo Strategy. **International Air Transport Association**. 2018. Disponível em: <https://www.iata.org/whatwedo/cargo/Documents/cargo-strategy.pdf>.

_____. New era for air cargo: How e-commerce is accelerating logistics transformation. **International Air Transport Association**. 2021. Disponível em: <https://www.iata.org/en/publications/store/new-era-air-cargo-ecommerce-whitepaper-2021>.

ISHUTKINA, MARIYA A.; R. JOHN HANSMAN (2009). Analysis of the Interaction Between Air Transportation and Economic Activity: A Worldwide Perspective. **MIT International Center for Air Transportation (ICAT)/ Department of Aeronautics & Astronautics** Massachusetts Institute of Technology Cambridge. Report No. ICAT-2009-2, 2009.

KARUNATHILAKE, A. N.; FERNANDO, A. Identifying the key influencing factors for the growth of air cargo demand. **Journal of Global Operations and Strategic Sourcing**, v. 17, n. 2, p. 368-383, 2024. doi: 10.1108/JGOSS-06-2022-0072.

LOTTI, R.; CAETANO, M. The airport choice of exporters for fruit from Brazil. **Journal of Air Transport Management**, v. 70, p. 104-112, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2018.05.003>.

MADHAVAN, M.; ALI SHARAFUDDIN, M.; PIBOONRUNGROJ, P.; YANG, C.-C. Short-term forecasting for airline industry: The case of Indian air passenger and air cargo. **Global Business Review**, v. 24, n. 6, p. 1-35, 2020. doi: 10.1177/0972150920923316.

MAGALHÃES, M. A.; ARAGÃO, J. A.; YAMASHITA, Y. Definição de transporte. **Transportes**, v. 22, n. 3, p. 1-11, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v22i3.655>. .

OHI, S. J.; KIM, A. M. Count models to represent the impacts of weather and infrastructure on flight disruptions. **Transportation Research Record**, p. 1-12, 2020. doi: 10.1177/0361198120916731.

ROCHA, C. H.; SILVA, B. A.; DA SILVA, F. G. F. Brazilian Airports Granted and Financial Precariousness. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 34., 2020. Digital. **Anais... Digital: ANPET**, 2020.

SAMPAIO, A. P. A.; ANDRADE, M. O. de; FALCÃO, V. A.; DOMINGOS, M. C. F.; OLIVEIRA, A. M. de. Air Transport Demand Forecast to Making the Regional Aviation Sustainable in Northeast of Brazil. **Journal of Sustainable Development**, v. 14, n. 6, p. 69-86, 2021. doi: 10.5539/jsd.v14n6p69.

VEGA H. Air cargo, trade and transportation costs of perishables and exotics from South America. **Journal of Air Transport Management**, p. 324-328, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2008.08.006>.

WOOLDRIDGE, J. M. Introdução à Econometria. **Editora Thomson**, p. 295-328, 2006.

XU, F.; HANAOKA, S.; ONISHI, M. Multi-airport privatization in a Japanese region with trip-chain formation. **Journal of Air Transport Management**, v. 80, 101690, 2019. doi: 10.1016/j.jairtraman.2019.101690.

YANG, C.-H.; SHAO, J.-C.; LIU, Y.-H.; JOU, P.-H.; LIN, Y.-D. Application of fuzzy-based support vector regression to forecast of international airport freight volumes. **Mathematics**, v. 10, n. 14, 2399, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/math10142399>.

YUAN, X.-M.; LOW, J. M.; TANG, L. C. Roles of the airport and logistics services on the economic outcomes of an air cargo supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 127, n. 2, p. 215-225, 2010. doi: 10.1016/j.ijpe.2009.08.005.

YUEN, A.; ZHANG, A.; HUI, Y. V.; LEUNG, L. C.; FUNG, M. Is developing air cargo airports in the hinterland the way of the future? **Journal of Air Transport Management**, v. 61, p. 15-25, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.09.009>.