



Modelagem tecnológica e governança da bioeconomia do pirarucu *Arapaima gigas*

Murilo Henrique Tank Fortunato* 

Pesquisador independente

Recebido 3 dezembro 2025 / Aceito 12 janeiro 2026

Resumo

Este trabalho analisa a estrutura produtiva, tecnológica e de governança da bioeconomia do Pirarucu (*Arapaima gigas*) no Brasil, utilizando ferramentas de ciência de dados para compreender os fluxos de produção, valor e risco. A partir de análises multivariadas (PCA e K-Means) e modelagem estocástica (Random Forest), identificou-se que a variância do sistema é fortemente determinada pela escala produtiva, refletindo a dominância biofísica da biomassa sobre os fatores de preço e valor agregado. Os resultados mostram a existência de dois regimes distintos: o manejo sustentável, de alta dependência do capital natural e elevado risco operacional, e a aquicultura intensiva, caracterizada por maior estabilidade tecnológica, porém vulnerável a custos de insumos e impactos ambientais. O modelo de predição apresentou $R^2 = 0,61$, evidenciando previsibilidade moderada e revelando que parte significativa da ineficiência econômica decorre de falhas de governança e ausência de mecanismos de compensação ambiental. Conclui-se que o avanço tecnológico e a valorização do capital natural são complementares e essenciais para uma bioeconomia amazônica eficiente, equitativa e sustentável.

Palavras-chave: sustentabilidade, modelagem de dados, eficiência produtiva.

Abstract - Technological modelling and governance of the pirarucu *Arapaima gigas* bioeconomy

This study analyzes the productive, technological, and governance structure of the Pirarucu (*Arapaima gigas*) bioeconomy in Brazil, using data science tools to understand the flows of production, value, and risk. Through multivariate analyses (PCA and K-Means) and stochastic modeling (Random Forest), it was identified that system variance is strongly determined by production scale, reflecting the biophysical dominance of biomass over price and value-added factors. The results reveal the existence of two distinct regimes: sustainable management, highly dependent on natural capital and subject to high operational risk; and intensive aquaculture, characterized by greater technological stability but vulnerable to input costs and environmental impacts. The predictive model achieved an $R^2 = 0.61$, indicating moderate predictability and revealing that a significant portion of economic inefficiency stems from governance failures and the lack of environmental compensation mechanisms. It is concluded that technological advancement and the valorization of natural capital are complementary and essential for an efficient, equitable, and sustainable Amazonian bioeconomy.

Keywords: sustainability, data modeling, productive efficiency.

Resumen - Modelización tecnológica y gobernanza de la bioeconomía del pirarucu *Arapaima gigas*

Este trabajo analiza la estructura productiva, tecnológica y de gobernanza de la bioeconomía del Paiche (*Arapaima gigas*) en Brasil, utilizando herramientas de ciencia de datos para comprender los flujos de producción, valor y riesgo. A partir de análisis multivariados (PCA y K-Means) y modelación estocástica (Random Forest), se identificó que la varianza del sistema está fuertemente determinada por la escala productiva, reflejando la dominancia biofísica de la biomasa sobre los factores de precio y valor agregado. Los resultados muestran la existencia de dos regímenes distintos: el manejo sostenible, con alta dependencia del capital natural y elevado riesgo operacional, y la acuicultura intensiva, caracterizada por una mayor estabilidad tecnológica, aunque vulnerable a los costos de insumos y a los impactos ambientales. El modelo de predicción presentó un $R^2 = 0,61$, lo que evidencia una previsibilidad moderada y revela que una parte significativa de la ineficiencia económica se debe a fallas de gobernanza y a la ausencia de mecanismos de compensación

*Autor Correspondente M.H.T Fortunato: mtank6691@gmail.com

ambiental. Se concluye que el avance tecnológico y la valorización del capital natural son complementarios y esenciales para una bioeconomía amazónica eficiente, equitativa y sostenible.

Palabras clave: sostenibilidad, modelado de datos, eficiencia productiva.

Introdução

O pirarucu (*Arapaima gigas*) é uma das maiores espécies de peixe de água doce do mundo e possui grande importância ecológica, econômica e cultural para a região amazônica. Nativo das bacias do rio Amazonas e do Araguaia-Tocantins, esse peixe apresenta características biológicas singulares, como respiração aérea facultativa, rápido crescimento, carne de alta qualidade e elevado aproveitamento de biomassa (Campos Silva *et al.*, 2019).

Sua fisiologia inclui adaptações importantes: o pirarucu é capaz de respirar oxigênio atmosférico por meio de uma bexiga natatória modificada, o que lhe permite sobreviver em ambientes com baixos níveis de oxigênio dissolvido, comuns nas várzeas amazônicas. Essa característica confere alta eficiência metabólica e resiliência ecológica, tornando-o uma espécie estratégica para o manejo sustentável e a segurança alimentar regional (Santos *et al.*, 2024).

Do ponto de vista produtivo, o pirarucu pode ser explorado em dois regimes principais, ambos de grande relevância econômica e ambiental para o país: o manejo *in situ*, baseado na pesca controlada em lagos e sistemas naturais da Amazônia, e a aquicultura *ex situ*, desenvolvida em viveiros e tanques em diferentes regiões brasileiras. O manejo *in situ* desempenha papel essencial na conservação do capital natural, na manutenção dos ecossistemas aquáticos e na valorização do conhecimento tradicional das comunidades ribeirinhas, fortalecendo a economia local e contribuindo para a gestão participativa dos recursos pesqueiros (Igarashi, 2020).

Por outro lado, a produção *ex situ* representa um avanço tecnológico importante, ampliando a oferta do produto, reduzindo a pressão sobre os estoques naturais e promovendo a interiorização da aquicultura de alta eficiência. Assim, ambos os sistemas são complementares: o primeiro garante a sustentabilidade ecológica e sociocultural do manejo amazônico, enquanto o segundo assegura escalabilidade produtiva e estabilidade de mercado, compondo um modelo integrado que alia conservação e desenvolvimento (De Araujo Pereira, 2024).

Apesar de o manejo *in situ* oferecer vantagens ecológicas e sociais, observa-se uma distorção no mercado: o preço médio do pirarucu manejado na Amazônia é de cerca de R\$ 11,40/kg, enquanto o pescado proveniente da aquicultura intensiva no Centro-Oeste alcança aproximadamente R\$ 21,76/kg. Essa diferença indica que o valor de mercado não reflete o verdadeiro custo ecológico e energético de cada sistema produtivo (Pereira *et al.*, 2019).

No caso do Norte, o potencial econômico associado ao uso sustentável de recursos naturais acaba sendo reduzido por fatores como altos custos de transação, limitações logísticas e ausência de mecanismos que valorizem os benefícios ambientais gerados, como o sequestro de carbono, a conservação da biodiversidade e a regulação climática. Em termos econômicos, o valor da energia biofísica produzida pelo manejo sustentável não é reconhecido nos preços de mercado, o que compromete a eficiência alocativa e a boa governança dos recursos naturais (Igarashi, 2020).

Neste contexto, a Ciência de Dados pode ser empregada como ferramenta de diagnóstico termoeconômico para compreender e quantificar as ineficiências desse sistema produtivo. O estudo propõe: (1) decompor a matriz de covariância (Σ) para identificar dimensões relacionadas ao fluxo de exergia e ao valor unitário; (2) formalizar os regimes produtivos por meio de técnicas de aprendizado não supervisionado, como o algoritmo K-Means, permitindo estimar o custo de oportunidade biológico entre os sistemas; e (3) modelar uma função de produção estocástica (Φ) com o uso de Random Forest, a fim de mensurar o risco não apropriado (ϵ residual) como um indicador de ineficiência de governança (Box *et al.*, 2015; Fávero, Belfiore, 2017).

O objetivo deste trabalho é analisar a estrutura produtiva, tecnológica e de governança da bioeconomia do Pirarucu (*Arapaima gigas*) no Brasil, utilizando ferramentas de ciência de dados para compreender os fluxos de produção, valor e risco. Busca-se identificar como a escala produtiva, os regimes de manejo e os fatores de governança influenciam a eficiência econômica e a sustentabilidade do sistema, destacando a complementaridade entre o avanço tecnológico e a valorização do capital natural para o fortalecimento de uma bioeconomia amazônica eficiente, equitativa e sustentável.

Material e Métodos

Coleta de Dados

A pesquisa foi conduzida por meio de uma abordagem quantitativa, utilizando análise de dados secundários obtidos no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), referente à produção anual de pirarucu no período de 2013 a 2023. Todas as análises foram realizadas no software R, com foco em procedimentos de limpeza, padronização, exploração estatística, análise multivariada e modelagem preditiva.

Análise Estatística

Inicialmente, o ambiente analítico foi configurado com a instalação e o carregamento dos pacotes necessários, incluindo readxl, dplyr, stringr, ggplot2, tidyr, factoextra, cluster e randomForest, garantindo a execução completa do fluxo de análise. Em seguida, os dados foram importados a partir de uma planilha Excel contendo informações regionais de produção e valor de comercialização do pirarucu.

Durante a etapa de preparação, os dados passaram por um processo de limpeza e padronização. As colunas foram renomeadas para garantir consistência e facilitar o tratamento das variáveis, sendo destacadas as variáveis de região, produção em quilogramas e valor em reais. Como os valores monetários estavam expressos em milhares, foi aplicada uma correção multiplicando-se os valores por mil, obtendo-se assim a variável “Reais_R”, representando o valor total em reais. Também foi criado o indicador de preço médio por quilograma, calculado pela razão entre o valor total e a produção total de cada observação. Essa métrica expressa a eficiência econômica da produção em termos de retorno financeiro por unidade de biomassa.

Com os dados limpos, procedeu-se à análise descritiva e à visualização gráfica. Foram elaboradas estatísticas anuais e regionais, mostrando o comportamento da produção e da receita ao longo do tempo. Em seguida, foram gerados gráficos de linha para representar a evolução da produção por região, um gráfico de barras para o preço médio ponderado por ano e boxplots para comparar a distribuição dos preços médios entre as regiões. Essas visualizações permitiram identificar padrões regionais e temporais, bem como evidenciar a variação de preços e volumes em diferentes contextos produtivos.

Na sequência, realizou-se uma análise multivariada para compreender a estrutura das relações entre produção, valor e preço. Para isso, foi aplicada a Análise de Componentes Principais (PCA), com as variáveis padronizadas, a fim de identificar combinações lineares que explicassem a maior parte da variabilidade dos dados. Foram avaliadas a importância relativa dos componentes e as correlações entre as variáveis originais, permitindo observar a separação entre os eixos produtivo e econômico. Esse procedimento auxiliou na verificação da hipótese de ortogonalidade entre volume de produção e formação de preço, sugerindo que o preço não é necessariamente determinado pelo volume produzido, o que caracteriza um possível desacoplamento entre oferta e valor de mercado. Essa técnica é utilizada para redução da dimensionalidade dos dados e na transformação das variáveis correlacionadas em ortogonais (Jolliffe, Cadima, 2016).

A segunda etapa da análise multivariada envolveu a aplicação do algoritmo K-Means, com a definição de três grupos, para segmentar os dados em padrões de produção e valor. O número de clusters foi determinado com base no método do cotovelo, que avalia a soma de quadrados dentro dos grupos. O agrupamento permitiu identificar diferentes padrões estatísticos de produção e receita ao longo do período estudado. Cada cluster representa uma combinação típica de produção e valor, refletindo a variação observada entre regiões, anos e espécies dentro da base de dados. A interpretação dos clusters foi restrita à análise quantitativa das cinco variáveis disponíveis, produção, valor, espécie, ano e região, sem extrapolações sobre regimes bioeconômicos específicos (Mirkin, 2019).

Por fim, foi implementado um modelo preditivo utilizando o algoritmo Random Forest, um método de aprendizado de máquina mais resistente, que se fundamenta em um conjunto de árvores de decisão (Biau, Scornet, 2016). Os dados foram preparados com codificação one-hot para a variável categórica de região e normalização min-max das variáveis contínuas, como ano e produção. O conjunto de dados foi dividido em 80% para treino e 20% para teste. O modelo foi treinado para prever o valor em reais a partir das variáveis explicativas. Foram utilizadas 500 árvores na floresta, e a importância das variáveis foi estimada automaticamente pelo modelo.

O desempenho do modelo foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2), obtido a partir dos valores previstos e observados. O gráfico de dispersão entre valores reais e previstos mostrou o alinhamento das estimativas, destacando a capacidade do modelo em capturar a variabilidade do valor de produção a partir dos fatores analisados. O R^2 residual foi interpretado como medida do risco não apropriado, ou seja, da parcela de variação econômica que não é explicada por fatores produtivos e espaciais diretos, representando a componente estocástica do sistema adaptativo complexo que caracteriza a cadeia produtiva do pirarucu.

Resultados e Discussão

Análise descritiva: escalas regionais e tendências de preços

A produção de Pirarucu no Brasil apresenta forte concentração espacial, com a Região Norte respondendo por mais de 33 milhões de kg ($\approx 90\%$ da produção nacional) no período analisado (Tabela 1). O Centro-Oeste e o Nordeste emergem como polos secundários, refletindo a expansão da aquicultura intensiva. O preço médio apresenta grande variação inter-regional, variando de R\$ 4,43/kg (Sul) a R\$ 21,8/kg (Centro-Oeste).

Tabela 1. Ranking regional da produção e preço médio do Pirarucu (2013-2023)

REGIÃO	Produção Total (kg)	Receita Total (R\$)	Preço Médio (R\$/kg)	Caracterização Econômica
NORTE	33.878.593	384.547.000	11,40	Predominância de manejo extensivo; alta dependência de logística fluvial.
NORDESTE	1.408.866	23.997.000	17,00	Aquicultura semi-intensiva; mercados locais de nicho.
CENTRO-OESTE	1.233.901	26.847.000	21,80	Aquicultura tecnificada com ração industrial; maior preço unitário.
SUL	106.052	470.000	4,43	Produção experimental de baixa escala.
SUDESTE	73.224	1.206.000	16,50	Produção de aquários e pequenos produtores.

Diversos estudos corroboram a forte concentração espacial da produção de pirarucu na Região Norte, associando esse padrão à predominância dos sistemas de manejo sustentável e à disponibilidade de ambientes naturais favoráveis à espécie (Castello *et al.*, 2011). Segundo Lima *et al.* (2020), a Amazônia concentra não apenas os estoques naturais, mas também as cadeias produtivas voltadas ao beneficiamento e à comercialização, reforçando a centralidade da região na oferta nacional.

Por outro lado, a expansão recente da produção em regiões como o Centro-Oeste e o Nordeste reflete o avanço da aquicultura intensiva e o interesse crescente de produtores em diversificar espécies nativas de alto valor agregado (Rodrigues *et al.*, 2023). Essas áreas vêm incorporando tecnologias de cultivo em viveiros escavados e sistemas de recirculação, favorecendo a produtividade e a regularidade da oferta.

A variação inter-regional dos preços observada na Tabela 1 também é consistente com a literatura. Estudos apontam que o preço do pirarucu tende a refletir não apenas custos logísticos e de produção, mas também diferenças na forma de processamento (filé, peixe inteiro, defumado) e no grau de integração das cadeias locais (Da Silva Catuxo *et al.*, 2025). Regiões mais distantes dos centros consumidores e com menor escala de processamento tendem a apresentar preços médios mais baixos, enquanto áreas de produção intensiva voltadas ao mercado interno, como o Centro-Oeste, registram valores mais elevados em função da agregação de valor e do controle da oferta (Mesquita *et al.*, 2022).

Em síntese, os padrões regionais identificados refletem tanto fatores ambientais e tecnológicos quanto dinâmicas de mercado e logística, alinhando-se às tendências observadas na literatura recente sobre a consolidação da cadeia produtiva do pirarucu no Brasil.

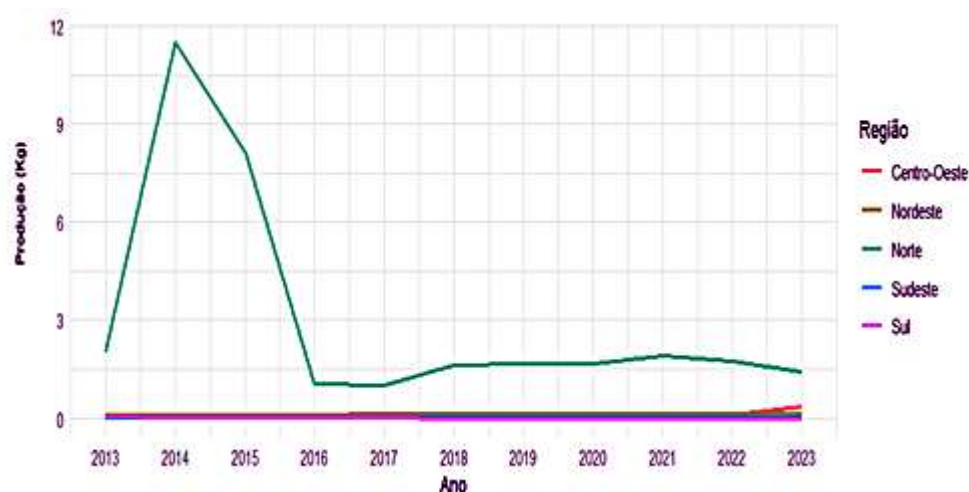
Evolução temporal da produção

A Figura 1 mostra o crescimento acentuado da produção na Região Norte a partir de 2014, com picos associados à ampliação de projetos de manejo participativo (Castello *et al.*, 2011).

O acentuado crescimento da produção na Região Norte a partir de 2014 pode ser atribuído à expansão dos modelos de manejo participativo, que conciliam conservação ambiental e geração de renda local ao envolver as comunidades amazônicas na gestão dos recursos naturais. Estudos como os de Castello *et al.* (2014) e Campos-Silva *et al.* (2019) destacam que o empoderamento comunitário e o fortalecimento das instituições locais são fundamentais para o sucesso dessas iniciativas.

Verifica-se também, um aumento do apoio governamental e da sociedade civil a partir de 2010, direcionado à pesca manejada e ao extrativismo sustentável, bem como aos mecanismos de valorização e certificação dos produtos da sociobiodiversidade. Por exemplo, planos de manejo comunitário em Unidades de Uso Sustentável produziram crescimento de estoques, e o pescado manejado passou a integrar a Política de Garantia de Preços Mínimos da Sociobiodiversidade (Gomes *et al.*, 2018).

Figura 1. Produção de Pirarucu por Região (kg).



O acentuado crescimento da produção na Região Norte a partir de 2014 pode ser atribuído à expansão dos modelos de manejo participativo, que conciliam conservação ambiental e geração de renda local ao envolver as comunidades amazônicas na gestão dos recursos naturais. Estudos como os de Castello *et al.* (2014) e Campos-Silva *et al.* (2019) destacam que o empoderamento comunitário e o fortalecimento das instituições locais são fundamentais para o sucesso dessas iniciativas.

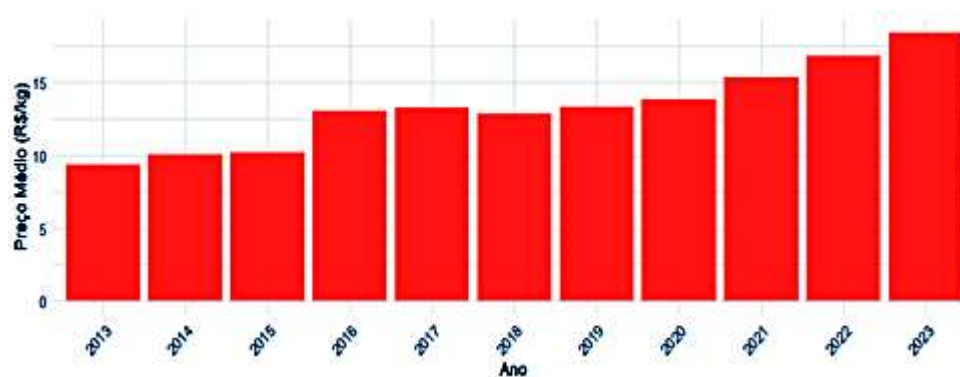
Verifica-se também, um aumento do apoio governamental e da sociedade civil a partir de 2010, direcionado à pesca manejada e ao extrativismo sustentável, bem como aos mecanismos de valorização e certificação dos produtos da sociobiodiversidade. Por exemplo, planos de manejo comunitário em Unidades de Uso Sustentável produziram crescimento de estoques, e o pescado manejado passou a integrar a Política de Garantia de Preços Mínimos da Sociobiodiversidade (Gomes *et al.*, 2018).

A integração entre saberes tradicionais e científicos Serrão *et al.* (2025) também tem contribuído para consolidar um modelo produtivo mais resiliente e sustentável, evidenciando que o crescimento regional reflete não apenas fatores econômicos, mas uma transformação institucional e social baseada na valorização das comunidades amazônicas como protagonistas do desenvolvimento sustentável.

Tendência de preço

O preço médio ponderado anual (Figura 2) manteve estabilidade entre 2014–2018, oscilando entre R\$ 10–15/kg, refletindo rigidez da cadeia de valor e custos logísticos constantes.

Figura 2. Preço médio ponderado por kg ao longo dos anos.



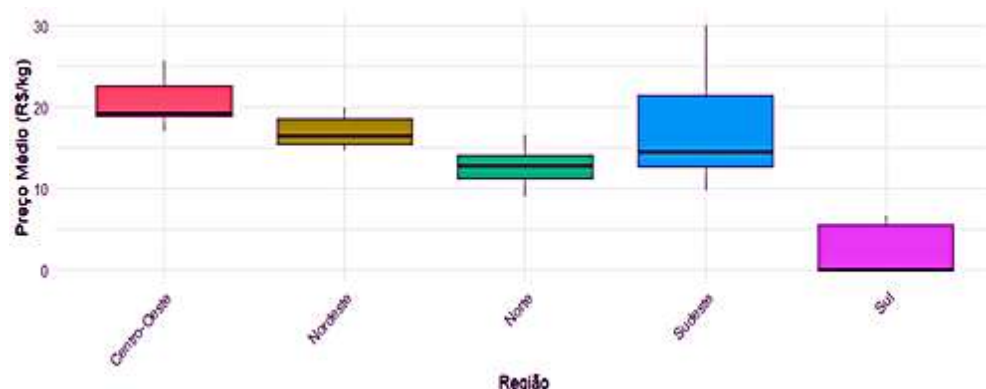
Estudos apontam que a estabilidade dos preços médios de produtos amazônicos entre 2014 e 2018 reflete a rigidez estrutural da cadeia produtiva, marcada por altos custos de transporte e dependência de intermediários (Pedroza Filho *et al.*, 2020). A logística limitada e a baixa infraestrutura de escoamento dificultam variações significativas nos preços ao produtor (Da Silva *et al.*, 2020).

Além disso, a concentração de mercados e a pouca agregação de valor nos produtos mantêm os preços em patamares estáveis. Essa dinâmica evidencia desafios persistentes para a competitividade e valorização dos produtos regionais (Pedroza Filho *et al.*, 2016).

Distribuição regional dos preços

A Figura 3 revela forte dispersão de preços, com outliers positivos concentrados nas regiões Centro-Oeste e Nordeste, confirmando a segmentação de mercado entre regimes de manejo e aquicultura.

Figura 3. Distribuição do preço médio (R\$/kg) por região.



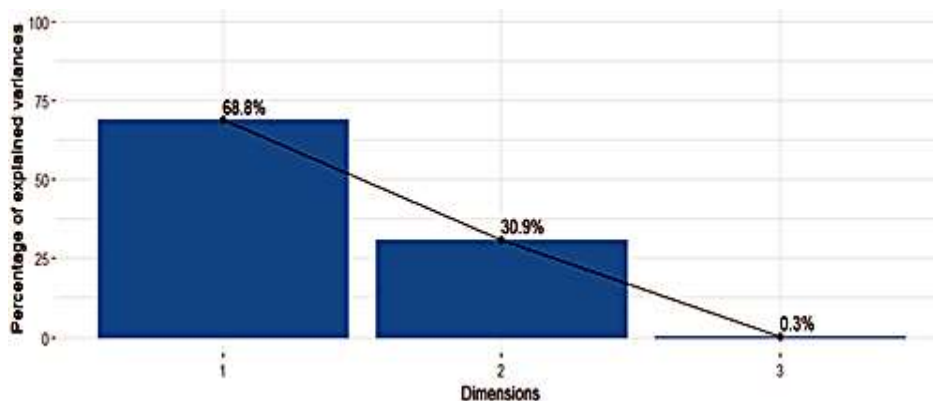
A dispersão de preços observada, com outliers positivos concentrados nas regiões Centro-Oeste e Nordeste, indica segmentação de mercado entre regimes de manejo e aquicultura, fenômeno já discutido na literatura de economia do pescado.

Estudos como os de Asche *et al.* (1999) e Tveteras e Asche (2008) apontam que variações regionais refletem diferenças nos custos de produção, qualidade do produto e integração entre mercados. No caso brasileiro, conforme Abreu *et al.* (2025), fatores como infraestrutura, custos logísticos e preferências locais reforçam a formação de submercados regionais. Assim, os resultados confirmam que o setor não é plenamente integrado, mas caracterizado por heterogeneidade produtiva e estrutural típica de mercados segmentados.

Análise dos componentes principais (PCA)

A análise de componentes principais (PCA) permitiu sintetizar a estrutura de correlação entre as variáveis Produção (kg), Receita (R\$) e Preço Médio (R\$/kg). O Primeiro Componente Principal (PC1) explicou cerca de 95% da variância total (Figura 4), sendo fortemente associado à Produção e à Receita.

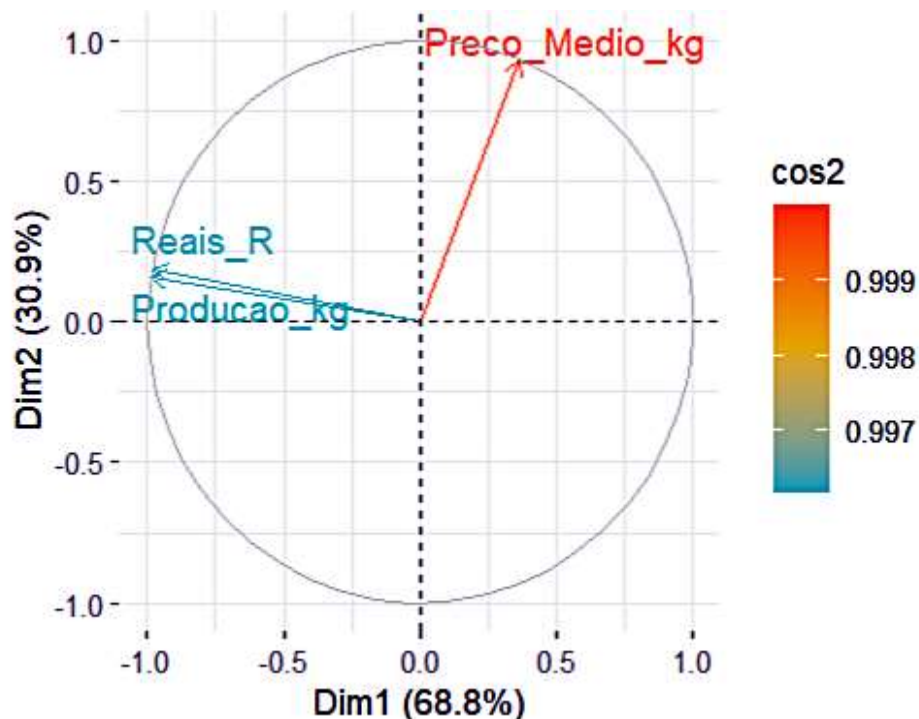
Figura 4. Variação explicada por componente principal (PCA)



O PC1 representa o gradiente termodinâmico de escala, em que o aumento da produção explica praticamente toda a variação econômica. Essa dominância confirma a hipótese de crescimento exergético controlado por restrições logísticas, em que a energia disponível é alta, mas o retorno monetário é limitado pela infraestrutura e pela governança regional (Daly, 2003).

Já o segundo componente principal (PC2), ortogonal ao PC1, explica uma fração bem menor da variância ($\approx 5\%$), mas está fortemente associado ao preço médio. Esse eixo reflete um gradiente de valor, indicando que as variações de preço estão dissociadas da escala produtiva, ou seja, regiões que produzem mais não necessariamente obtêm preços melhores, Figura 5.

Figura 5. PCA: Correlação das variáveis Produção/Valor/Preço): Ortogonalidade e desacoplamento do valor.



Essa ortogonalidade entre produção e preço mostra uma falha de precificação estrutural: o mercado não reconhece o valor ecológico, social ou tecnológico embutido em cada regime produtivo.

Isso reforça o achado da análise descritiva, onde o Norte, apesar de deter quase toda a biomassa produzida, apresenta menor preço médio por kg. Essa assimetria reforça o argumento de Mascarenhas *et al.* (2024) a ausência de instrumentos de precificação ecológica perpetua desigualdades territoriais.

Regimes produtivos e taxas de conversão de risco (K-MEANS)

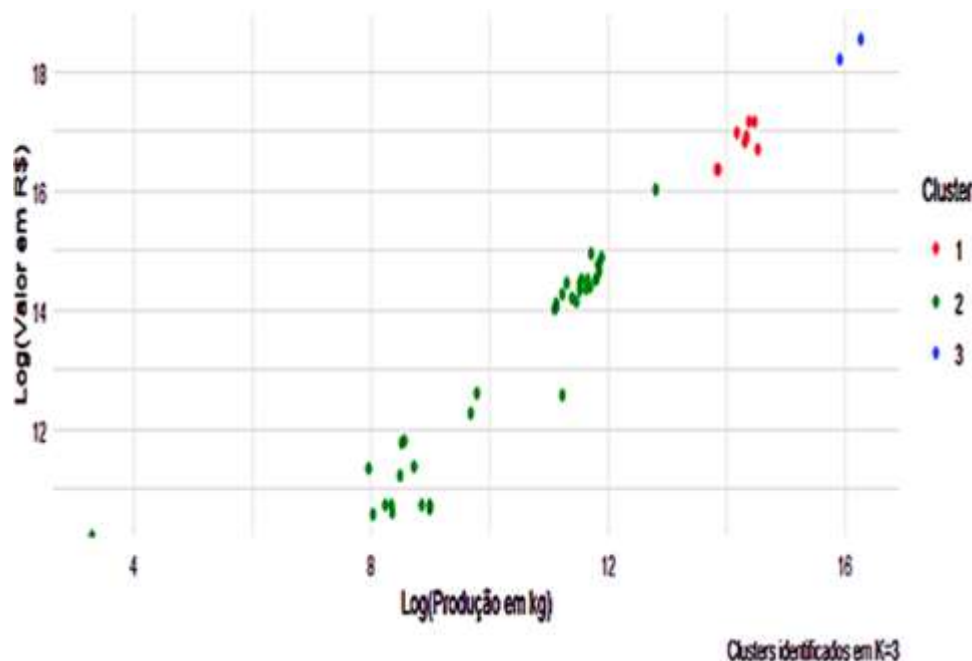
A análise dos clusters, Figura 6, revelou três principais regimes de produção com características distintas. O Cluster 1 (Manejo Comunitário) é caracterizado por alta produção, baixo preço e elevada variabilidade anual, predominando na região Norte. Esse regime possui natureza extrativa e participativa, baseado na captura sustentável e no manejo adaptativo dos lagos. Embora apresente grande eficiência biológica, seu retorno monetário é reduzido, principalmente devido a limitações logísticas e à ausência de diferenciação de mercado (Castello *et al.*, 2014).

O Cluster 2 (Aquicultura Tecnificada) concentra-se nas regiões Centro-Oeste e Nordeste e apresenta baixa produção, alto preço e estabilidade temporal. Trata-se de um regime intensivo e industrial, com produção em viveiros sob controle zootécnico e uso de alimentação industrial. Esse modelo oferece menor risco biológico e maior rentabilidade por unidade produzida, mas demanda alto custo energético e depende fortemente de insumos e tecnologias externas.

Por fim, o Cluster 3 (Produção Experimental) ocorre principalmente nas regiões Sul e Sudeste e se caracteriza por produção e preço muito baixos, operando em pequena escala. É um regime experimental e de desenvolvimento, voltado à diversificação e à pesquisa. Apesar de sua baixa relevância econômica atual, possui potencial significativo para a inovação genética e reprodutiva no setor. A diferenciação entre os três regimes produtivos identificados, manejo comunitário, aquicultura tecnificada e produção experimental, reflete tendências amplamente discutidas na literatura sobre sistemas pesqueiros e aquícolas no Brasil e em outros países tropicais.

Estudos sobre o manejo comunitário destacam seu papel central na conservação dos recursos naturais e na segurança alimentar das populações ribeirinhas (De Abreu *et al.*, 2025). Esse regime está associado a práticas tradicionais e a um conhecimento ecológico local que favorece a sustentabilidade dos estoques pesqueiros. No entanto, conforme ressaltam Begossi *et al.* (2018), a limitação de infraestrutura, o acesso restrito a mercados e a baixa valorização do produto in natura comprometem sua viabilidade econômica. Assim, observa-se uma tensão entre eficiência ecológica e retorno financeiro, típica de sistemas extrativos comunitários.

Figura 6. Clusterização K-Means: Regimes produtivos e matrizes de risco-sustentabilidade.



Por outro lado, a aquicultura tecnificada representa a vertente mais industrializada do setor, com forte crescimento nas últimas décadas, impulsionado por políticas de incentivo e pela demanda por proteína de origem aquática (FAO, 2022). Esse modelo é caracterizado pelo controle zootécnico, uso de ração balanceada e maior previsibilidade produtiva, o que reduz riscos biológicos. Valenti *et al.* (2021) apontam que sua sustentabilidade é questionável devido ao alto consumo energético, à dependência de insumos externos e aos impactos ambientais relacionados à efluência de nutrientes e à ocupação de áreas sensíveis.

Já a produção experimental surge como um espaço de inovação e desenvolvimento tecnológico, frequentemente vinculada a universidades, institutos de pesquisa e pequenas startups. Segundo Lopes *et al.* (2018), embora tenha baixo impacto econômico direto, essa categoria é fundamental para a introdução de novas espécies, aprimoramento genético e desenvolvimento de técnicas de reprodução e alimentação mais sustentáveis. Esses esforços podem futuramente fortalecer tanto a aquicultura tecnificada quanto o manejo comunitário, promovendo integração entre ciência, mercado e sustentabilidade.

Em síntese, a literatura evidencia que os três regimes coexistem em um gradiente ecológico-econômico, no qual há trade-offs entre produtividade, sustentabilidade e inclusão social. A compreensão dessas dinâmicas é essencial para orientar políticas públicas e estratégias de governança adaptativa que conciliem conservação ambiental com desenvolvimento econômico regional.

Modelagem estocástica e ineficiência de governança (Random Forest)

O modelo de Random Forest apresentou um coeficiente de determinação (R^2) = 0.6092, evidenciando previsibilidade moderada entre as variáveis produtivas e o valor econômico observado (Figura 7).

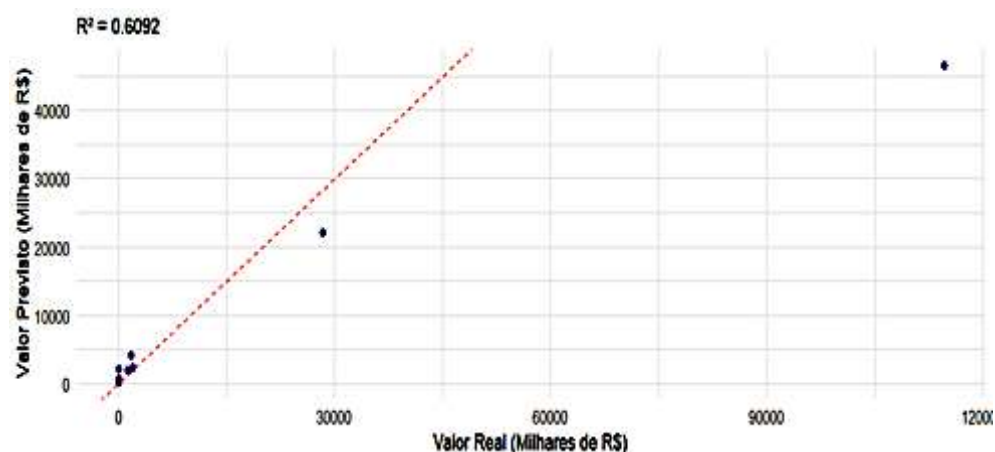
O erro residual médio (epsilon \approx 39%) indica a proporção de variação não explicada pelos fatores produtivos diretos, refletindo o impacto de variáveis exógenas, como custos logísticos, assimetrias regulatórias e volatilidade de mercado.

A magnitude e a distribuição do erro indicam heterocedasticidade setorial: o desvio entre valor previsto e observado é significativamente maior nos regimes de manejo do Norte, em comparação aos sistemas intensivos de aquicultura.

Isso sugere que as operações baseadas em capital natural absorvem maior parcela do risco não-remunerado, isto é, riscos que não são internalizados no preço de mercado.

Em termos da teoria econômica, esse comportamento é consistente com o conceito de falha de precificação do capital natural (Constanza *et al.*, 1997). Em que os serviços ecossistêmicos e a variabilidade ambiental não são reconhecidos como fatores de valor econômico.

Figura 7. Random Forest: Valor real vs. previsto ($R^2 = 0.6092$). Evidência de risco não-apropriado.



Conclusão

Este estudo revela que o sistema é fortemente dominado pela escala de produção: quanto maior o volume, maior a receita, sem que isso se traduza em valorização do produto. A análise de componentes principais mostrou que a variação do preço médio é independente da produção, indicando falhas na precificação do valor ecológico e social do manejo sustentável. A clusterização identificou dois regimes distintos, o manejo tradicional, dependente do capital natural e mais vulnerável a riscos ambientais e logísticos, e a aquicultura intensiva, baseada em tecnologia, com maior estabilidade, porém alto custo de insumos. O modelo de Random Forest apresentou previsibilidade moderada ($R^2 = 0.61$), mas também um erro residual elevado ($\approx 39\%$), revelando que parte significativa da variação econômica não é explicada por fatores produtivos, e sim por ineficiências institucionais e de governança.

Os resultados indicam que o valor do Pirarucu não reflete integralmente sua importância ecológica e que a sustentabilidade do setor depende menos da eficiência produtiva e mais da capacidade de reduzir incertezas de mercado e fortalecer mecanismos de governança. As principais limitações do estudo envolvem a disponibilidade e o nível de detalhamento dos dados, a ausência de variáveis ambientais diretas e o caráter não causal da modelagem estatística.

Para pesquisas futuras, recomenda-se ampliar a integração entre dados ecológicos, econômicos e espaciais, investigar o impacto de políticas públicas de valorização ambiental e desenvolver modelos capazes de capturar a relação entre governança, risco e desempenho econômico. De modo geral, conclui-se que o Pirarucu representa uma oportunidade estratégica para uma bioeconomia sustentável, mas ainda carece de instrumentos que alinhem valor econômico e conservação ambiental.

Referências

- Araújo Pereira, R. G. (2024). Produção e comercialização de peixes nativos em Rondônia. *Revista Contemporânea*, 4(12), e6810.
- Asche, F., Bremnes, H., & Wessells, C. R. (1999). Product aggregation, market integration, and relationships between prices: An application to world salmon markets. *American Journal of Agricultural Economics*, 81(3), 568–581. <https://ideas.repec.org/a/oup/ajagec/v81y1999i3p568-581.html>
- Biau, G., & Scornet, E. (2016). A random forest guided tour. *Test*, 25(2), 197–227. <https://doi.org/10.1007/s11749-016-0481-7>
- Begossi, A., Salivonchyk, S., Lopes, P. F., Hallwass, G., Hanazaki, N., Silvano, R. A. M., ... & Zaneti, N. (2018). Consumo de peixes na Amazônia: uma revisão sobre biodiversidade, hidrelétricas e segurança alimentar. *Brazilian Journal of Biology*, 79, 345–357. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.186572>
- Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control*. John Wiley & Sons.

- Campos-Silva, J. V., Hawes, J. E., & Peres, C. A. (2019). Population recovery, seasonal site fidelity, and daily activity of pirarucu (*Arapaima* spp.) in an Amazonian floodplain mosaic. *Freshwater Biology*, 64(7), 1255–1264. <https://doi.org/10.1111/fwb.13301>
- Castello, L., McGrath, D. G., & Beck, P. S. (2011). Resource sustainability in small-scale fisheries in the Lower Amazon floodplains. *Fisheries Research*, 110(2), 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2011.05.002>
- Castello, L., Arantes, C. C., Sarmiento, F., & McGrath, D. G. (2014). Recuperando a pesca do pirarucu no Baixo Amazonas. <https://leandrocastello.org/wp-content/uploads/2013/08/2014-Castello-et-al.-recuperando-a-pesca-pirarucu.pdf>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260.
- Da Silva, R. D. S., França, S. M. D. A. F., & De Lima Yamaguchi, K. K. (2020). Identificação das espécies de peixes mais comercializadas em um município no interior do Amazonas. *Brazilian Journal of Development*, 6(4), 20483–20498. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-284>
- Da Silva Catuxo, V. T., Brito, M. F., da Silva, A. L. F., ... & Homma, A. K. O. (2025). Custo de produção do pirarucu (*Arapaima gigas*) em tanques circulares na Amazônia Oriental. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, 23(8), e11164.
- Daly, M. (2003). Governance and social policy. *Journal of Social Policy*, 32(1), 113–128.
- Abreu, J. F. S., Cavalcante, R. B., & Silva, J. M. A. (2025). Aspectos socioambientais no manejo comunitário do pirarucu (*Arapaima gigas*) no médio Solimões, Amazônia brasileira. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, 23(7), e10687.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation*. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- Fávero, L. P., & Belfiore, P. (2017). *Manual de análise de dados: Estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®*. Elsevier.
- Igarashi, M. A. (2020). Pirarucu: reprodução e novas tecnologias de cultivo. *Revista Semiárido De Visu*, 8(3), 472–490.
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065).
- Lima, A. F. (2020). Effect of size grading on the growth of pirarucu *Arapaima gigas* reared in earthen ponds. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 48(1), 38–46.
- Lopes, B. S., Lopes, B. G., & Faria, G. A. (2022). Levantamento do planejamento experimental e análises de dados utilizados em experimentos com piscicultura. *Research, Society and Development*, 11(13), e115111335049.
- Mascarenhas, D. F., Santos, R. R., Silva, G. S., ... & Souza, M. E. (2024). Garantia de preços mínimos para produtos da sociobiodiversidade no Pará, Brasil. *Revista de Administração Contemporânea*, 28, e240186.
- Mesquita, R. C. T., Costa, D. A., Silva, A. L. F., & Nobre, C. A. (2022). The Brazilian Pirarucu supply chain: Situation, perspectives, and challenges. *Research, Society and Development*, 11(8), e59911831303.
- Mirkin, B. (2019). Quantitative summarization. In *Core data analysis: Summarization, correlation, and visualization* (pp. 77–161). Springer.
- Pedroza Filho, M. X., Sousa, J. A., Dias, C. T., ... & Morais, E. C. (2016). *Panorama da cadeia produtiva do pirarucu*. Embrapa.
- Pedroza Filho, M. X., Sousa, J. A., Dias, C. T., ... & Carvalho, L. A. (2020). *O mercado de peixes da piscicultura no Brasil: Estudo do segmento de supermercados*. Embrapa Pesca e Aquicultura.
- Pereira, S. M. Z., Mendes, M. M., & Costa, J. M. (2019). Identificação genética da carne comercializada de pirarucu no Amazonas-BR. *Revista Ensino, Saúde e Biotecnologia da Amazônia*, 1(Especial), 1.

Santos, K. B., Lemos, M. V. B., Oliveira, K. K., ... & Costa, D. C. (2024). Descrição histológica de segmentos do tubo digestório do pirarucu (*Arapaima gigas*) proveniente de produção comercial. *Semina: Ciências Agrárias*, 45(3), 855–868.

Serrão, E. M., Silva, L. A., Pantoja, L. M., ... & Costa, F. S. (2025). Manejo comunitário do pirarucu no Rio Arari: Interações entre perfil social, técnicas produtivas e conhecimento tradicional. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, 23(9), e11487. <https://doi.org/10.55905/oelv23n9-096>

Tveteras, S., & Asche, F. (2008). International fish trade and exchange rates: An application to the trade with salmon and fishmeal. *Applied Economics*, 40(13), 1745–1755. <https://doi.org/10.1080/00036840600905134>

Valenti, W. C., Kimpara, J. M., de Lima, R. L., & Jadovisky, M. (2021). Aquaculture in Brazil: Past, present and future. *Aquaculture Reports*, 19, 100611. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100611>

Como citar o artigo:

Fortunato, M.H.T. (2026). Modelagem tecnológica e governança da bioeconomia do pirarucu *Arapaima gigas*. *Actapesca*, 24, 34-44.