



O mundo em três Dimensões: Sistemas Nacionais de Inovação e o "Efeito Rainha Vermelha"

Hellen Marianne Oliveira Resende¹;
Clara Peralva Carvalho²;
Marcos Vinicius Silva Marques³;
Laura Alcântara Lara de Mesquita⁴;
Vitória Amaral Gonçalves⁵.

Resumo: O presente trabalho tem como objetivo investigar os Sistemas de Inovação Nacionais (SNIs) por meio de uma abordagem analítica baseada em dados a fim de avaliar as diferentes posições dos SNIs ao redor do mundo. Para isso, é retomado o conceito do “Efeito Rainha Vermelha”, em que é possível visualizar as crescentes dificuldades que as nações periféricas têm em termos de produção científica e tecnológica para alcançar o nível de desenvolvimento das nações do centro. Nesse sentido, foi empregada uma nova metodologia de clusterização, atualizando os dados utilizados em trabalhos anteriores sobre o tema e aplicando os dados de produção científica, patentes e pib per capita no algoritmo HDBSCAN (*Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*). A análise tridimensional permite uma compreensão sob uma nova perspectiva da evolução dos SNIs. Os resultados são discutidos a partir de uma estrutura dividida em seis seções, abordando desde a relação centro-periferia até a análise dos achados e reflexões sobre a aplicação da nova metodologia.

Palavras-chave: Sistemas Nacionais de Inovação; Centro-Periferia; Desenvolvimento; Ciência; Tecnologia.

Código JEL: O30; O33; 057

Área Temática: 4.3 Sistemas de inovação – nacional, regional, setorial, tecnológico

¹ Graduanda em Relações Econômicas Internacionais pela UFMG. E-mail: hellen_marianne2001@hotmail.com

² Graduanda em Relações Econômicas Internacionais pela UFMG. E-mail: cclaperalva@gmail.com

³ Graduando em Ciências Econômicas pela UFMG. E-mail: marcvinetri956@gmail.com

⁴ Graduanda em Ciências Econômicas pela UFMG. E-mail: lauraalmesquita@gmail.com

⁵ Graduanda em Relações Econômicas Internacionais pela UFMG. E-mail: vitoriaufmgamaralgonc@gmail.com

The World in Three Dimensions: National Innovation Systems and the "Red Queen Effect"

Abstract: This paper aims to investigate National Innovation Systems (NISs) through a data-driven analytical approach in order to assess the different positions of NISs around the world. To this end, the concept of the “Red Queen Effect” is revisited, in which it is possible to visualize the increasing difficulties that peripheral nations have in terms of scientific and technological production to reach the level of development of central nations. In this sense, a new clustering methodology was employed, updating the data used in previous works on the subject and applying the data on scientific production, patents and GDP per capita in the HDBSCAN algorithm (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise). The three-dimensional analysis allows a new understanding of the evolution of NISs. The results are discussed based on a structure divided into six sections, addressing everything from the center-periphery relationship to the analysis of the findings and reflections on the application of the new methodology.

Keywords: National Innovation Systems; Center-Periphery; Development; Science; Technology.

1. Introdução

O presente artigo apresenta o tema do Sistema de Inovação Nacional (SNI) sob um prisma de análise de dados das variáveis escolhidas, de modo a conferir à análise a mesma avaliação de densidade e de posição dos diferentes SNIs, evidenciando possibilidades de mudança. A relevância do estudo é demonstrada não apenas pelas consequências das dinâmicas assimétricas entre centro e periferia, determinantes na construção de SNIs, mas também pelas possibilidades de mudança desse panorama, como os projetos de *catch-up* tecnológico desenvolvidos pelos emergentes. O local de onde fala a periferia é marcado por desigualdades estruturais que obstaculizam seu desenvolvimento técnico, científico, econômico e social, e os avanços aqui realizados não ocorrem na mesma velocidade que o centro. Tal fato demonstra a força de uma analogia que norteia este artigo, o “efeito Rainha Vermelha”: uma máquina evolutiva deve ser rápida o suficiente para manter suas capacidades de sobrevivência competitiva. Em situações de profunda desigualdade, largar na frente não apenas propicia distância do seu concorrente, mas uma outra restrição se interpõe: o movimento de tentar romper essa barreira é cada vez mais difícil, e perde-se espaço cada vez mais frente aos demais, alargando o *gap*.

O artigo objetiva atualizar dois trabalhos anteriores de suma importância para a discussão sobre sistemas nacionais de inovação, Ribeiro *et al.* (2006) e Chaves *et al.* (2020). O uso estatístico para avaliar SNIs se perpetua aqui, utilizando dados de pesquisas científicas e patentes produzidas nacionalmente, parte basilar desse sistema e das interações de seus agentes formadores: universidades, iniciativa privada e instituições de pesquisa. Logo, aqui o conhecimento tácito assume função de uma importante variável na quantificação do nível conquistado por um país, em especial com a correlação positiva entre a produção científica e o crescimento da economia.

Entre as principais contribuições, está uma nova metodologia de clusterização para os países, o algoritmo HDBSCAN (*Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*). Conceitos como o SNI e o “efeito Rainha Vermelha” são retomados, ao passo que uma metodologia diferenciada é aplicada para incrementar a discussão e habilitar uma nova análise sobre os níveis tecnológicos alcançados, propiciando uma investigação aprofundada e balizada para comparações entre diferentes países e seus sistemas nacionais de inovação, com benefícios consideráveis frente à metodologia anterior, com importância e detalhamento melhor discutidos na Seção 3 e 4 - Dados e Metodologia. A partir da extração e análise dos dados com a nova metodologia, clusters com diferentes densidades foram encontrados, e sua análise tridimensional dos dados será debatida na Seção 5 - Análise dos Resultados.

A estrutura do presente artigo se articula em cinco seções, discutindo os seguintes aspectos: 2 - Divisão Centro-periferia e os Sistemas de Inovação, retomando o conceito da “Rainha Vermelha”; 3 - Dados, 4 - Metodologia, para análises comparativas entre as nações descritas; e 5 - Análise dos Resultados, com apresentações gráficas dos diferentes níveis de desenvolvimento e clusterização dos países. Por fim, a Seção 6 trata das considerações finais sobre o estudo, buscando concomitantemente um breve apanhado dos achados, bem como reflexões acerca das implicações da nova abordagem metodológica e um desdobramento acerca de como o aperfeiçoamento da metodologia pode corroborar as tendências percebidas.

2. Sistemas Nacionais de Inovação e a Divisão Centro-Periferia: Revisitando o Efeito Rainha Vermelha

O conceito de sistemas nacionais de inovação é desenvolvido no final dos anos 80, com os textos seminais de Freeman (1987; 1995), Nelson (1987) e Lundvall (1992). Esta abordagem explora a forma como diversos fatores organizacionais, políticos, econômicos e institucionais se articulam para gerar inovação por meio do uso e difusão de ciência e tecnologia (Edquist, 2004). Um Sistema Nacional de Inovação (SNI) é a estrutura organizacional de um país, os agentes que estão envolvidos neste processo de inovação e como eles interagem: empresas, universidades, governos, instituições de pesquisa e instituições financeiras. Assim, este arcabouço teórico articula diferentes facetas do processo de produção de inovação, que vão além dos mecanismos de mercado ou apenas resultado de um esforço de pesquisa e desenvolvimento (P&D), ressaltando sua essência como o produto de um sistema, resultado de uma ação coletiva.

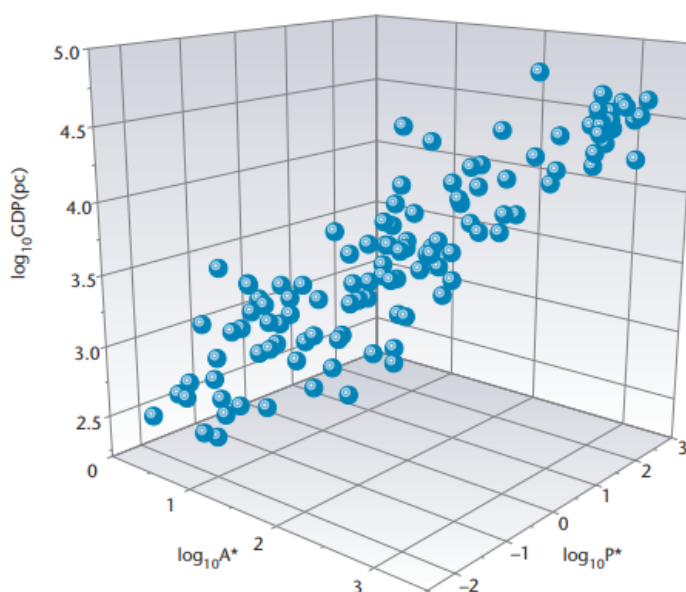
Dois aspectos constituintes da construção do Sistema Nacional de Inovação de um país é o papel de revoluções tecnológicas, como sumarizado por Perez (2010), e a difusão destas numa divisão internacional do trabalho marcada por uma divisão centro-periferia. Chaves *et al.* (2020, p. 7) apontam que as revoluções tecnológicas são “resultado das instituições constitutivas dos sistemas de inovação”, e estas “renovam a liderança tecnológica e científica, criam novas disparidades entre países líderes e o resto, e apresentam novos desafios para retardatários” (Ribeiro; Albuquerque, 2015, p. 179). Além disso, na periferia, estas revoluções tecnológicas “reproduzem o subdesenvolvimento em níveis tecnológicos distintos, na medida em que o país se atualiza com as grandes transformações em curso no sistema econômico mundial, mas mantém sua inserção particular, periférica, na divisão internacional do trabalho” (Prates, 2022, p. 38).

Além de levar em conta a dinâmica inovativa no centro, mudanças estruturais do capitalismo global, como as crescentes redes internacionais de produção e inovação, os Sistemas de Inovação de países periféricos frequentemente precisam lidar com problemas que entram o processo de produção de inovação, como a pobreza e desigualdade, ao mesmo tempo que tentam engajar numa estratégia de *catch-up* com o centro (Prates, 2022, p. 32). Assim, é importante notar como a fortificação das instituições que compõem o SNI permite a criação de inovação endógena, como ressalta Freeman (1995).

Considerando esta divisão centro-periferia, e a crescente heterogeneidade da periferia, demonstrado por Ribeiro e Albuquerque (2015), tem-se a consolidação de uma diversidade de Sistemas Nacionais de Inovação. Nesse sentido, é preciso evocar a importância de uma literatura que aborda a construção de tipologias de Sistemas de inovação que levam em consideração o elemento temporal, a possibilidade de mudanças, internas aos sistemas de inovação e no cenário internacional, como Freeman (1995), Teixeira (2014). Ribeiro *et al.* (2006) e posteriormente Chaves *et al.* (2020) adicionam a esta literatura, ao propor uma metodologia para avaliar a posição internacional dos sistemas nacionais de inovação com base em estatísticas de ciência e tecnologia. Passaremos à revisão destes dois artigos.

Em Ribeiro *et al.* (2006), foram utilizados dados de patentes (registradas no *United States Patent and Trademark Office* - USPTO), artigos científicos (publicados e indexados pelo *Institute for Scientific Information* - ISI), população e PIB *per capita* (ajustado pela paridade de poder de compra - PPP) dos anos de 1974, 1982, 1990, 1998 e 2003 para 183 países. No Gráfico 1, tem-se o resultado deste modelo:

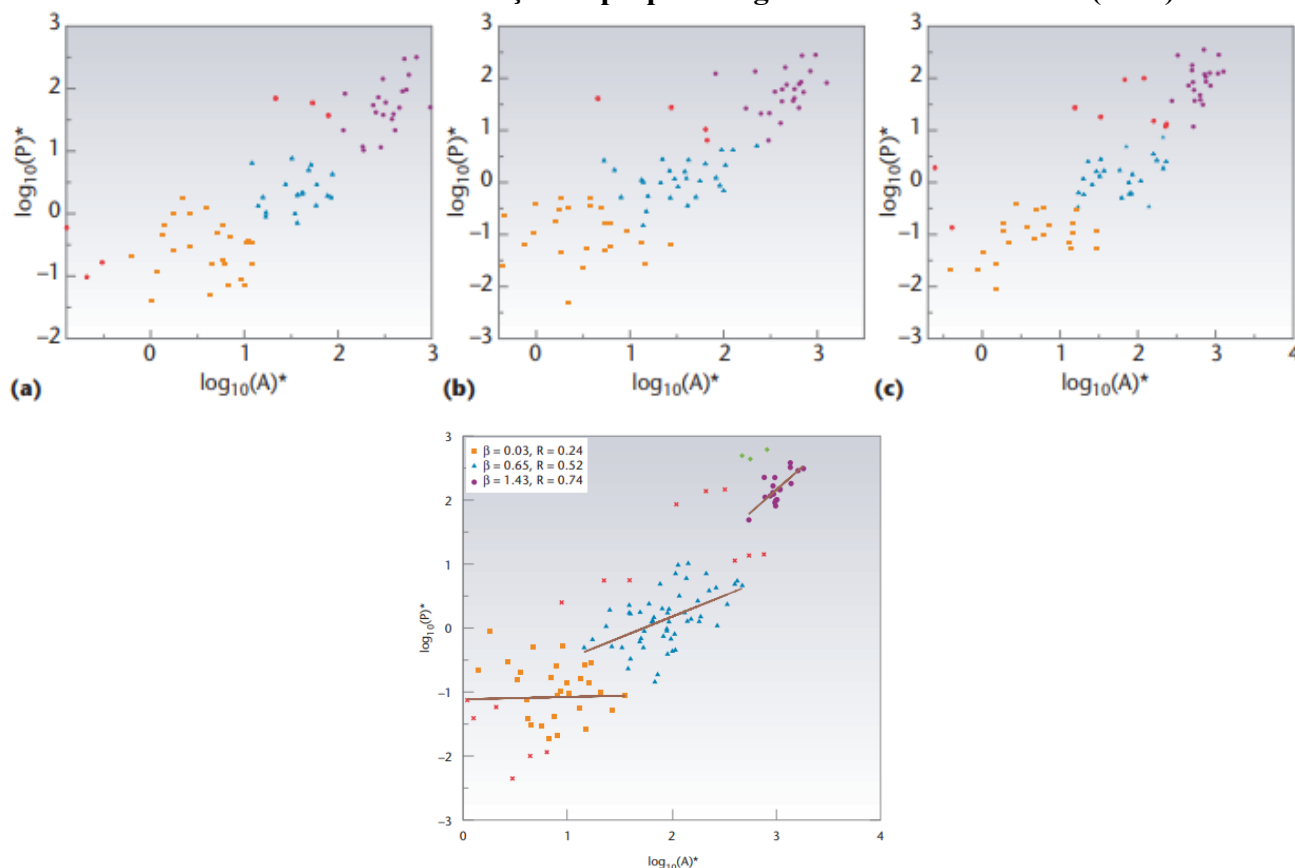
Gráfico 1 - O modelo de Ribeiro *et al.* (2006)



Fonte: Ribeiro et al. (2006)

No gráfico tridimensional, tem-se o $\log_{10}$ (produto interno bruto per capita) versus $\log_{10}$ (artigos por milhão de habitantes) versus $\log_{10}$ (patentes por milhão de habitantes), demonstrando as correlações entre as três variáveis para a média dos anos de 1999 e 2003. Usando a técnica da Clusterização Superparamagnética, descrita em Ribeiro *et al.* (2006, p. 88), foi possível agrupar os países e montar uma dinâmica no qual diferentes países podem mudar de grupo ao longo do tempo. O Gráfico 2 mostra a aplicação desta técnica para os anos de 1974, 1982, 1990, 1998 e 2003, respectivamente.

Gráfico 2 - Clusterização Superparamagnética em Ribeiro *et al.* (2006)

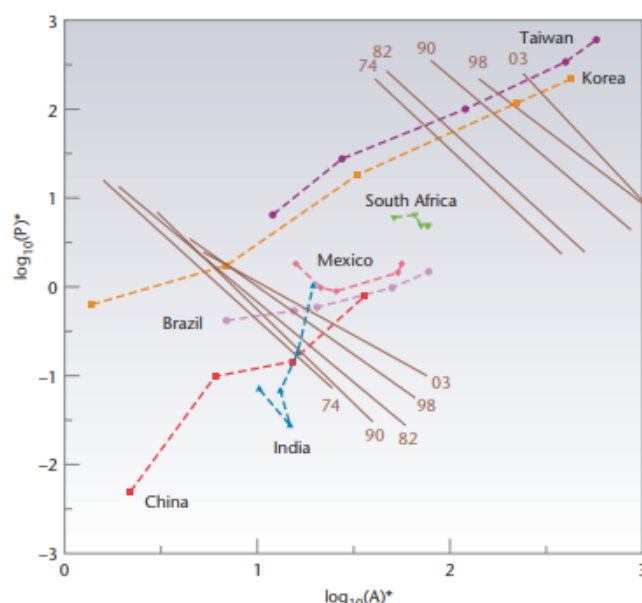


Fonte: Ribeiro et al. (2006)

A análise deste modelo leva a divisão dos países em três regimes distintos. O **Regime 1**, representado nos gráficos pelos pontos triangulares apresenta uma conexão muito fraca entre os agentes dos Sistemas Nacionais de Inovação. O segundo grupo, o **Regime 2**, representado pelos pontos circulares, são caracterizados pela fraca, porém presente conexão entre os agentes dos SNI e a capacidade de inovação ainda é fraca. O **Regime 3**, representado pelos pontos quadrados, são países nos quais as conexões entre os agentes estão totalmente formadas e tem-se uma elevada conversão da produção científica em inovação. Além disso, os pontos no topo do gráfico de 2003, representados por losangos, correspondem a Taiwan, Japão e Estados Unidos, e os países representados pelo "x" não pertencem a nenhum dos principais agrupamentos.

No Gráfico 3, tem-se o movimento de países selecionados entre os regimes 1 e 2 e entre os regimes 2 e 3.

Gráfico 3 – Movimento de Países Seleccionados em Ribeiro *et al.* (2006)



Fonte: Ribeiro *et al.* (2006)

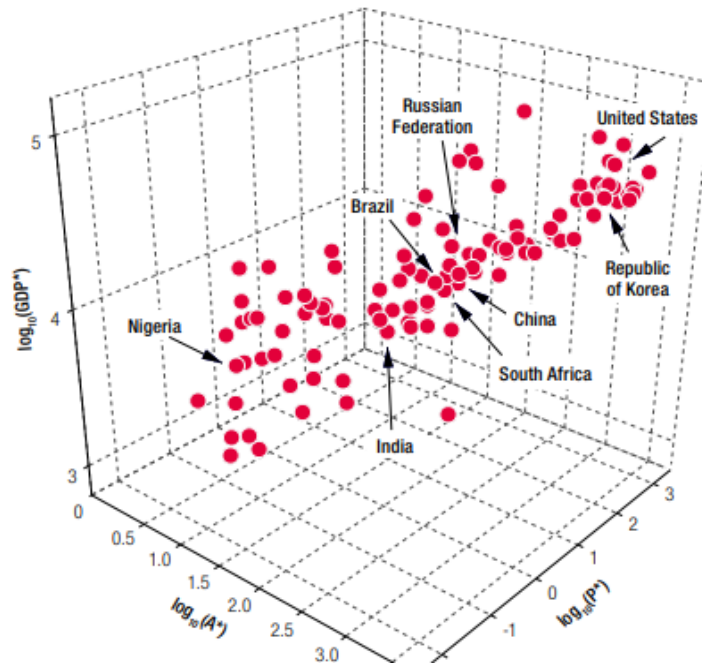
A partir deste modelo, Ribeiro *et al.* (2006) chegam a três principais conclusões. Primeiramente, ao analisar o Gráfico 1, é perceptível a forte correlação entre produção científica, tecnológica e expressivo crescimento econômico, de forma que países com maior PIB *per capita* tendem a produzir mais ciência e tecnologia.

Em segundo lugar, ao analisar o movimento dos países da Figura 3 ao longo dos 4 períodos de tempo, Ribeiro *et al.* (2006) verificam que é mais difícil ultrapassar a separação entre os regimes 2 e 3 do que entre os regimes 1 e 2, o que verifica o efeito “Rainha Vermelha”, que explica “quão rapidamente a maquinaria evolutiva deve operar para que uma determinada espécie mantenha suas capacidades competitivas de sobrevivência.” (Ribeiro *et al.*, 2006, p. 87). Numa análise econômica, países devem avançar tão rápido quanto seus concorrentes para manter sua posição. Analisando o movimento do Brasil, Índia, México e África do Sul, países com uma estrutura de Sistemas Nacionais de Inovação imaturos, todos apresentam este efeito: “Eles correm, mas não rápido o suficiente para melhorar significativamente sua posição.” (Ribeiro *et al.*, 2006, p. 90). O desenvolvimento de políticas para o desenvolvimento do SNI, nestes países tendem a ser relacionados às enormes desigualdades sociais e dificuldades econômicas (falta de investimento em educação, pobreza, reforma agrária, entre outros) enfrentadas por estes países. Já a trajetória da Coreia do Sul e Taiwan, no gráfico 3, representa dois casos de *catch-up* tecnológico bem sucedido, ambos países localizando-se no regime 3 ao final da análise, demonstrando que eles “correram” mais rápido que seus concorrentes.

Finalmente, Ribeiro *et al.* (2006) concluem que existe um aumento na eficiência entre a produção de ciência e tecnologia, à medida que o regime muda para cima, indicando mais conexões entre ciência e tecnologia nos países no regime 3. Essa constatação, aliada ao fato de que a fronteira entre os regimes 2 e 3 tem aumentado ao longo do tempo, indica uma dificuldade cada vez maior para uma transição de países intermediários para o grupo dos mais desenvolvidos. O efeito da “Rainha Vermelha” tem se intensificado ao longo do tempo.

No artigo de Chaves *et al.* (2020) também é usada a metodologia de Clusterização Superparamagnética para dados de patentes, artigos científicos e PIB *per capita* para os anos de 1974, 1982, 1990, 1998, 2006, 2012 e 2014. O objetivo é “avaliar a posição de sistemas nacionais de inovação no cenário internacional.” (Chaves *et al.*, 2020, p. 46), identificando a divisão centro-periferia e como essa divisão muda ao longo do tempo. O Gráfico 4 apresenta o resultado do modelo para os dados de 2014:

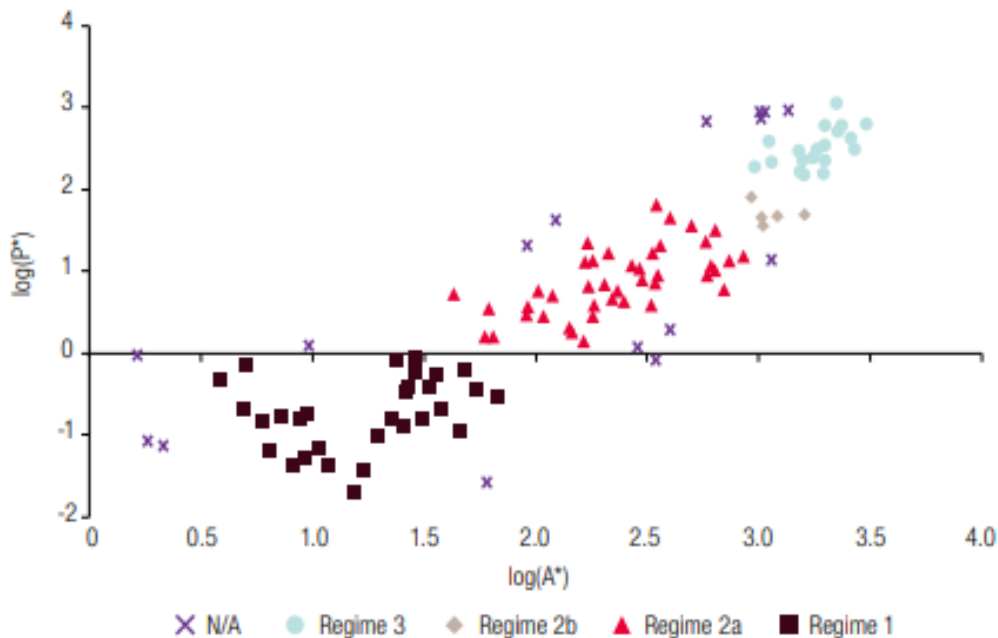
Gráfico 4 - Modelo de Chaves *et al.* (2020)



Fonte: Chaves *et al.* (2020)

Os autores também dividem os países em três diferentes regimes de interação, focando na divisão centro-periferia:

Figura 5 - Clusterização Superparamagnética e os Regimes de Chaves *et al.* (2020)



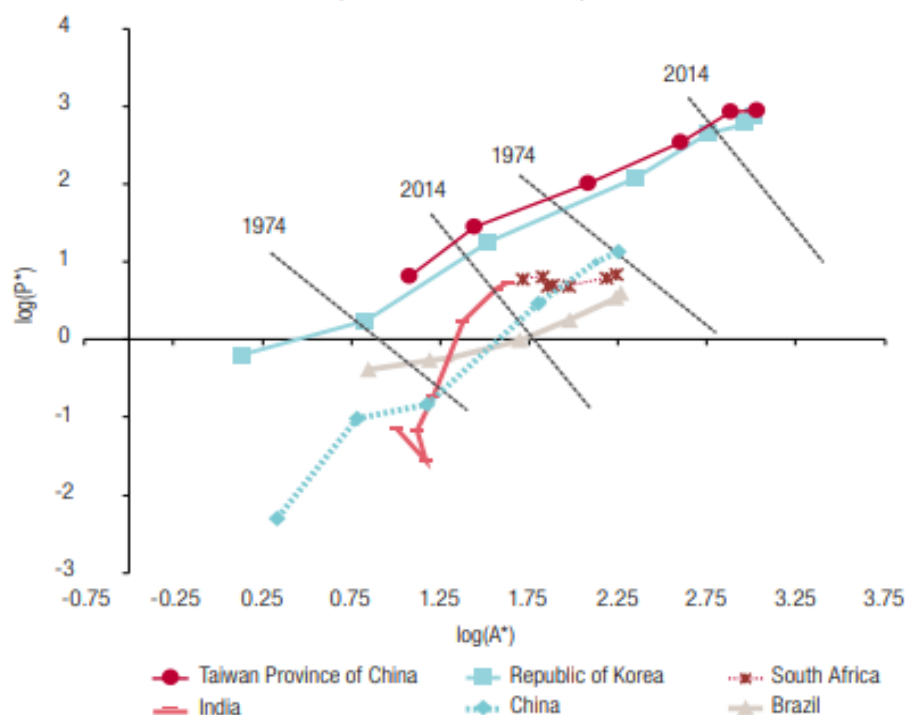
Fonte: Chaves *et al.* (2020)

O **Regime 1** é constituído de países com baixa produção científica e tecnológica, uma periferia distante. O **Regime 2**, países com produção intermediária, uma periferia mais próxima, são divididos em dois subgrupos: o **Regime 2A**, 45 países num estágio intermediário de desenvolvimento, e o **Regime 2B**, composto por 5 países que estavam no Regime 3 em 2012 mas em 2014 se encontravam

no regime 2. Assim, é ressaltada a crescente heterogeneidade da periferia na divisão. Já o **Regime 3**, são países com alta produção científica e tecnológica, no centro.

O Gráfico 6 indica o movimento dos limiares dos regimes para países selecionados:

Gráfico 6 - Movimento dos Limiares dos Regimes



Fonte: Chaves *et al.* (2020)

A reta “2014” na parte superior direita da Figura 6 representa o limiar entre os regimes 3 e 2 neste ano, enquanto a reta “1974” imediatamente a esquerda representa a posição deste mesmo limiar em 1974. Já a reta “1974” na parte inferior esquerda, representa o limiar entre os regimes 1 e 2 para aquele ano, enquanto a reta “2014” imediatamente a sua direita representa este mesmo limiar em 2014 (Chaves *et al.*, 2020).

A comparação entre a posição dos limiares entre 1974 e 2014 leva os autores a concluir que os limiares não são estáticos, o que corrobora com a visão neoschumpeteriana do impacto das revoluções tecnológicas sucessivas nos sistemas econômicos. Isso implica na conclusão de que a divisão centro-periferia também não é estática, o que é demonstrado pela movimentação do limiar entre os regimes 3 e 2. Ou seja, “o desafio para a realizar um processo de catch up torna-se mais complexo com a sucessão de revoluções tecnológicas no centro” (Chaves *et al.*, 2020). Assim como Ribeiro *et al.* (2006), os autores também identificam o “efeito Rainha Vermelha”, neste sentido. Chaves *et al.* (2020) também chamam atenção para a chamada “armadilha da renda média”, a medida que os “esforços realizados pelos países de renda média para manterem vantagens comerciais relacionadas à produção em massa e aos baixos custos de produção dificultam sua possível transição para o grupo de países de renda alta” (Chaves *et al.*, 2020, p. 56). Os autores alertam para a importância de mudanças na estrutura industrial para mitigação da armadilha e crescimento econômico sustentável.

Concluindo, assim como Ribeiro *et al.* (2006), Chaves *et al.* (2020) ressaltam uma correlação positiva entre as três variáveis: “quanto mais desenvolvido é um país, mais artigos e patentes ele consegue publicar e vice-versa.” (Chaves *et al.*, 2020, p. 50). Apesar de considerarem divisões diferentes, ambos artigos destacam a estrutura dos Sistemas de Inovação Nacionais como fundamentais para países que buscam realizar o *catch-up* tecnológico, mas também identificam uma crescente dificuldade neste movimento, ou seja, um “efeito Rainha Vermelha” cada vez mais amplificado.

3. Dados

Assim como os artigos mencionados, nosso novo modelo utilizou-se também de dados sobre o Produto Interno Bruto (PIB) *per capita*, medido em dólares americanos com base na paridade do poder de compra (PPP), assim como o total populacional de cada país, ambos obtidos no site do Banco Mundial. Da mesma forma, continuamos a considerar informações sobre registros de patentes da USPTO (*US Patent and Trademark Office*) e artigos científicos extraídos da *Web of Science*. Os dados correspondem ao ano de 2022, seguindo a sequência de análise em Ribeiro *et al.* (2006) e Chaves *et al.* (2020), em intervalos de 8 anos, iniciada em 1974.

Neste trabalho, o PIB *per capita* foi usado como uma variável proxy sobre o desenvolvimento econômico, a despeito da nossa interpretação abrangente envolvendo esse fenômeno⁶. Os dados utilizados são de PIB *per capita* em PPC (Paridade do Poder de Compra) a preços constantes de 2017, obtidos no *World Development Indicators Databank* do Banco Mundial. Apenas os dados de Yemen, Vietnã e Taiwan foram retirados da base de dados do *Maddison Project*, edição de 2023.

Os dados sobre produção científica são representados pelo número de artigos publicados em diferentes áreas de pesquisa e indexados na base de dados do *Web of Science*, originalmente criada pelo *Institute for Scientific Information* (ISI) e atualmente gerenciada pela *Clarivate Analytics*. No entanto, é importante destacar algumas limitações antes de interpretar os resultados. Como a análise se baseia exclusivamente em uma variável quantitativa, ela não considera a qualidade ou a relevância acadêmica das publicações — aspectos difíceis de mensurar e que tendem a favorecer países desenvolvidos, especialmente se o número de citações for adotado como critério de impacto científico, por exemplo.

Além do mais, a produção científica não se resume apenas à produção de artigos, sendo ela expressa também por eventos, congressos e conferências que reúnem, da mesma forma, inovações e conhecimento. Mas, para este trabalho, os dados do *Web of Science* oferecem uma contribuição enorme e segura sobre uma maneira eficiente de medir a inovação científica criada pelo mundo.

Por fim, os dados sobre produção tecnológica são representados pelos documentos de patentes emitidos pelo *United States Patent and Trademark Office* (USPTO), classificados por país de origem do inventor. Essas patentes são concedidas a criadores de novas invenções, assegurando-lhes o direito exclusivo de fabricação. Esse direito pode ser transferido para terceiros, geralmente o empregador do inventor, como uma empresa, além de poder ser vendido ou licenciado.

Ao todo, coletamos dados para 217 países, sendo que destes, 20 não possuem PIB *per capita*. Dentro dos 197 países que possuem dados sobre PIB *per capita*, 20 não apresentam dados de produção científica, 86 não possuem dados de produção tecnológica e 16 não apresentam nenhuma das produções⁷.

Utilizamos no modelo o logaritmo natural dos dados sobre PIB *per capita*, assim como os de artigos e patentes também em *per capita* para criar um gráfico de dispersão tridimensional que categoriza os países em clusters a partir de uma nova técnica de clusterização chamada *Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*.

⁶ O desenvolvimento é entendido, neste contexto, como um processo de transformação estrutural pautado na ampliação da distribuição de renda e na melhoria das condições de vida (Furtado, 2002; Fajnzylber, 2016).

⁷ Países e territórios sem dados sobre PIB e de produção tecnológica e/ou científica: Afghanistan, Albania, Andorra, Angola, Aruba, Belize, Benin, Bhutan, Bolívia, Botswana, British Virgin Islands, Burkina Faso, Burundi, Cabo Verde, Cambodia, Chad, Channel Islands, Comoros, Congo Dem. Rep., Congo Rep., Cote d'Ivoire, Cuba, Curacao, Czechia, Djibouti, Dominica, Egypt, El Salvador, Equatorial Guinea, Eritrea, Eswatini, Ethiopia, Fiji, French Polynesia, Gabon, Gambia, Gibraltar, Greenland, Grenada, Gua, Guinea, Guinea-Bissau, Haiti, Hong Kong SAR China, Iran Islamic Rep., Isle of Man, Kiribati, Korea Dem. People's Rep., Kosovo, Kyrgyz Republic, Lao PDR, Lesotho, Liberia, Libya, Liechtenstein, Macao SAR China, Madagascar, Malawi, Maldives, Mali, Marshall Islands, Mauritania, Micronesia Fed. Sts., Monaco, Mongolia, Mozambique, Myanmar, Nauru, Nepal, New Caledonia, Nicaragua, Niger, Northern Mariana Islands, Pacific island small states, Palau, Papua New Guinea, Puerto Rico, Rwanda, Samoa, San Marino, Sao Tome and Principe, Senegal, Sierra Leone, Sint Maarten (Dutch part), Slovak Republic, Solomon Islands, Somalia, South Sudan, St. Kitts and Nevis, St. Lucia, St. Martin (French part), St. Vincent and the Grenadines, Sudan, Suriname, Syrian Arab Republic, Tajikistan, Tanzania, Timor-Leste, Togo, Tonga, Trinidad and Tobago, Turkmenistan, Turks and Caicos Islands, Tuvalu, Vanuatu, Virgin Islands, West Bank and Gaza, Yemen, Zambia, Zimbabwe.

4. Metodologia

Nos artigos de 2006 e 2020, foram utilizados o método de clusterização superparamagnéticas, técnica utilizada no campo da física baseada nas propriedades físicas de um ferromagnético não homogêneo para formar os *clusters* de Sistemas de Inovação⁸.

A nova metodologia utilizada neste trabalho, o algoritmo HDBSCAN (*Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*), é uma generalização hierárquica do DBSCAN (*Density Based Spatial Clustering of Application with Noise*)⁹, projetada para identificar agrupamentos de dados em contextos onde a densidade dos clusters varia significativamente.

Seu funcionamento se baseia na criação de uma métrica de distância entre dois pontos de dados, chamada “distância de alcance mútuo” (*mutual reachability distance*). Essa métrica não considera apenas a distância euclidiana entre os pontos, mas também a densidade local estimada para cada um deles. Essa estimativa é feita a partir do parâmetro minPts, que define o número mínimo de vizinhos para um ponto ser considerado parte de um cluster. Esse parâmetro é utilizado para calcular a densidade da região, e a escolha desse valor foi feita por nós.

Regiões mais densas apresentarão distâncias menores em relação aos seus vizinhos, indicando uma maior proximidade entre os pontos. Por outro lado, regiões menos densas terão maiores distâncias para os vizinhos escolhidos, refletindo uma menor concentração de pontos na área.

As distâncias de alcance mútuo estimadas para todos os pares de pontos são usadas para construir um grafo de alcance mínimo (*minimum spanning tree*), onde as arestas são justamente essas distâncias calculadas entre os pontos e a soma delas é minimizada de forma que a estrutura fique o mais conectada possível.

A partir desse gráfico, o algoritmo constrói uma árvore hierárquica de clusters, na qual os agrupamentos de pontos surgem progressivamente, conforme as conexões entre eles se formam em função das densidades locais estimadas. Essa árvore passa por um processo de condensação hierárquica, no qual ela é transformada em uma representação mais simplificada, mantendo apenas os agrupamentos mais estáveis e persistentes ao longo da hierarquia. Isso reduz a complexidade estrutural do modelo. Esse processo é fundamental porque nem todos os grupos formados ao longo da hierarquia são estáveis — alguns surgem e desaparecem rapidamente, o que indica sua instabilidade.

Essa condensação permite a extração de agrupamentos ótimos e estáveis ao longo da hierarquia, utilizando um critério de persistência, o que evita a necessidade de definir um limiar fixo de densidade como ocorre no DBSCAN, método que pode não ser eficiente para um conjunto de dados com variadas densidades.

O HDBSCAN oferece vantagens significativas, como a capacidade de identificar automaticamente clusters com diferentes densidades, a classificação natural de pontos ruidosos como outliers e um melhor desempenho em dados com distribuições complexas, garantindo um processo mais dinâmico. Surge como uma técnica mais flexível do que a de agrupamento de dados superparamagnéticos justamente em razão da sua dinamicidade, que nos exime de escolher parâmetros como temperatura e número máximo de vizinhos, algo necessário nesse outro modelo, tornando-o menos sensível às nossas escolhas e de fácil ajuste para dados com mais observações e maior variabilidade.

O método superparamagnético, por ser inspirado na física estatística, exige conhecimento avançado em física computacional para que sejam realizadas as simulações de interação “magnética” entre os dados, o que implica em uma maior necessidade de capacidade de software e um maior precisão nos parâmetros de simulação.

Ainda assim, a despeito dos ganhos oferecidos pelo HDBSCAN, vale notar que ele ainda conta com uma dose de arbitrariedade ao termos que escolher o minPts, parâmetro fundamental para o cálculo de densidade dos pontos, como já foi mencionado anteriormente.

⁸ Veja mais em: Ribeiro *et al.* (2006). e Chaves *et al.* (2020).

⁹ DBSCAN também é um algoritmo de clusterização baseado em densidade, que identifica grupos de pontos densos e classifica pontos esparsos como outliers. Ele exige a definição de um raio de vizinhança para a construção dos clusters, diferentemente do HDBSCAN, que os identifica automaticamente.

Os resultados da aplicação desse algoritmo nos dados utilizados projetou um gráfico tridimensional para as informações sobre PIB *per capita* e artigos e patentes per capita para os países, separando-os em diferentes grupos a partir de suas características quantitativas. Sua análise será feita na seção seguinte.

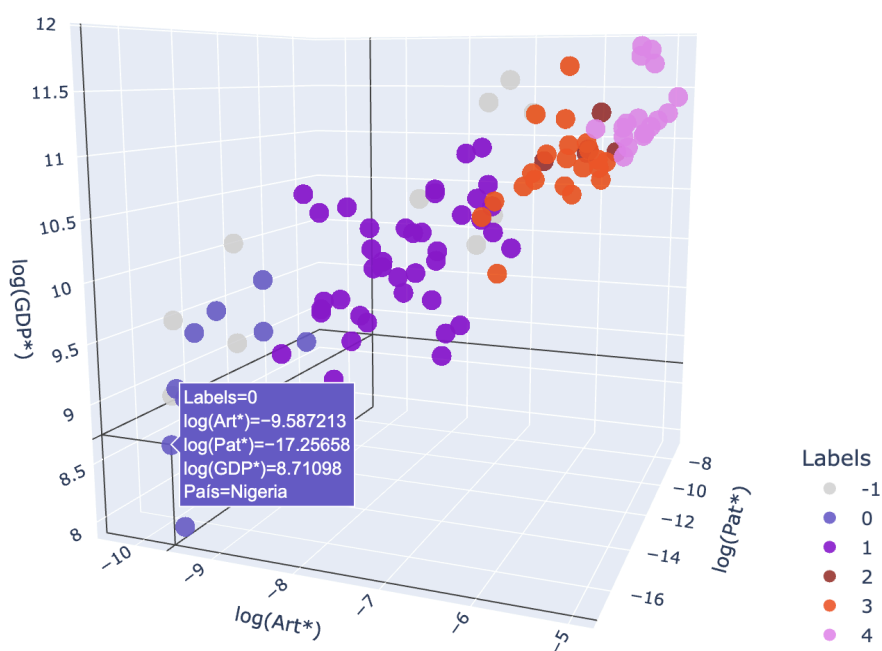
5. Análise dos resultados

A metodologia apresentada possibilita a compreensão da interação entre ciência e tecnologia e sua influência no amadurecimento dos sistemas nacionais de inovação, refletindo diretamente no desenvolvimento econômico dos países. Dessa forma, ela fornece um panorama dos distintos estágios de desenvolvimento das economias globais. Nesse contexto, esta seção tem como objetivo analisar as diferenças entre as técnicas de clusterização aplicadas na organização dos resultados obtidos em 2014 (Chaves *et al*, 2020) e aqueles observados em 2022. Para tanto, serão destacados quatro países representativos de diferentes estágios de desenvolvimento: Nigéria, Brasil, China e Estados Unidos.

Conforme já explorado, no artigo publicado em 2020, foi feita uma divisão em quatro regimes, que representam os diferentes níveis de interação entre ciência e tecnologia: os **Regime 1, 2a, 2b e 3**. A nova clusterização propõe uma categorização mais detalhada dos países em seis diferentes grupos, permitindo uma análise mais precisa da interação entre ciência e tecnologia em cada contexto nacional. Isso possibilita uma melhor compreensão das trajetórias de desenvolvimento e das particularidades de cada economia. Um grande diferencial do novo método de clusterização em relação à técnica anterior é a reorganização do heterogêneo bloco dos países periféricos em grupos mais precisos em relação às suas características principais, diminuindo o grau de generalização dos atributos desses países e aumentando a valorização das suas particularidades no que tange a seus sistemas de inovação.

O **Grupo 0** reúne países que compartilham desafios relacionados à infraestrutura científica, baixa capacidade de investimento em pesquisa e desenvolvimento e dificuldade em transformar conhecimento acadêmico em inovação tecnológica, tendo uma estrutura de inovação pouco integrada e com baixa interação entre ciência e tecnologia. Esse grupo inclui Uganda, Nigéria, Camarões, Gana, Paquistão, Iraque, Bangladesh, Uzbequistão, Indonésia, Paraguai, Azerbaijão e Argélia, correspondendo ao antigo Regime 1, com Azerbaijão, Bangladesh, Camarões, Gana, Indonésia, Iraque, Nigéria, Paquistão, Paraguai e Uzbequistão se mantendo na mesma posição. O gráfico abaixo permite visualizar a Nigéria, que se mantém em uma posição desfavorável, sem grandes mudanças em seu SNI nos últimos anos.

Gráfico 7 – Posição da Nigéria no Modelo Atual



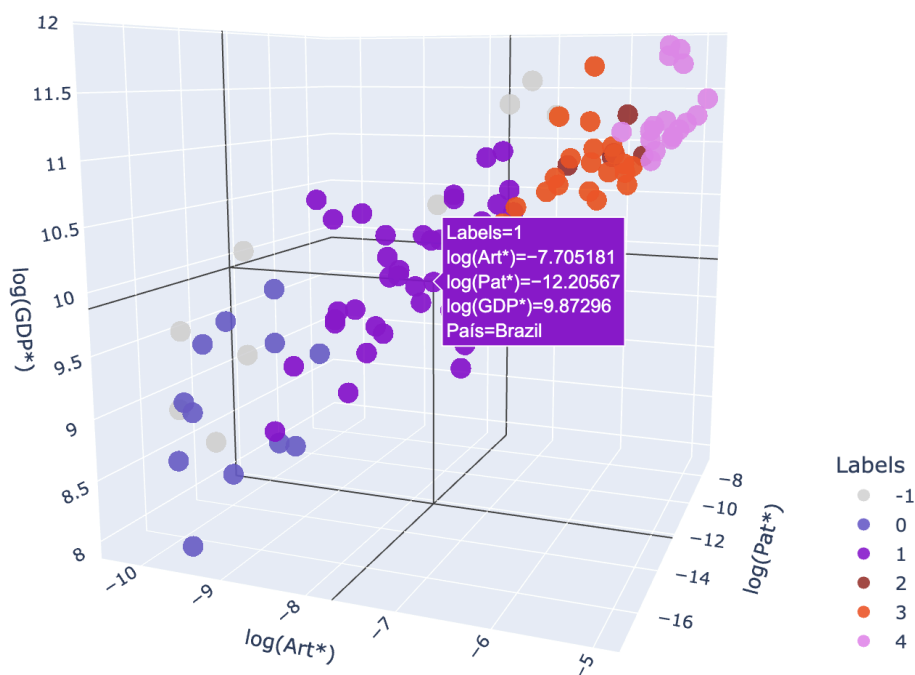
Fonte: Produção Própria

Já o **Grupo 1** representa um estágio intermediário de desenvolvimento, correspondendo ao Regime 2a do estudo de 2020. Esse grupo reúne países que apresentam uma interação mais estruturada entre ciência e tecnologia, embora ainda enfrentem barreiras para alcançar um nível mais avançado de inovação. Nesse grupo estão Marrocos, Quênia, Jamaica, Equador, Peru, Vietnã, Moldávia, Sri Lanka, Tunísia, Jordânia, Líbano, Índia, Namíbia, Bósnia e Herzegovina, Geórgia, Colômbia, Tailândia, África do Sul, Ucrânia, Brasil, Macedônia do Norte, México, Cazaquistão, Guiana, Panamá, Belarus, Omã, Argentina, Maurícia, Costa Rica, Armênia, Uruguai, Sérvia, Montenegro, Chile, Rússia, Turquia, Bahrein, Malásia, Romênia e Kuwait.

Cabe destacar que alguns países—como Cazaquistão, Equador, Moldávia, Peru, Quênia, Sri Lanka e Vietnã—, que no estudo de 2020 (cujos dados abrangiam até 2014) foram classificados no grupo menos desenvolvido, apresentaram um avanço significativo e passaram a integrar o Grupo 1 em 2022. Isso pode ser explicado por dois fatores: um real desenvolvimento de seus sistemas de inovação, e a mudança na metodologia de agrupamento. Enquanto no estudo anterior a clusterização era realizada em um espaço bidimensional, considerando apenas artigos científicos e patentes, na análise de 2022, o modelo passou a ser tridimensional, incorporando também o PIB *per capita*. Essa modificação metodológica levou alguns países a transitar entre os grupos.

No estudo de 2020, o Brasil estava classificado no Regime 2a. Em 2022, o Brasil continua a fazer parte de um grupo intermediário (Grupo 1). Essa permanência indica que, embora o país tenha mantido sua estrutura de inovação relativamente estável, ele não conseguiu avançar para os grupos mais desenvolvidos. No entanto, a mudança na metodologia da clusterização, ao incluir o PIB *per capita*, pode ter reforçado a posição do Brasil nesse grupo, uma vez que o desempenho econômico também influencia a capacidade de inovação.

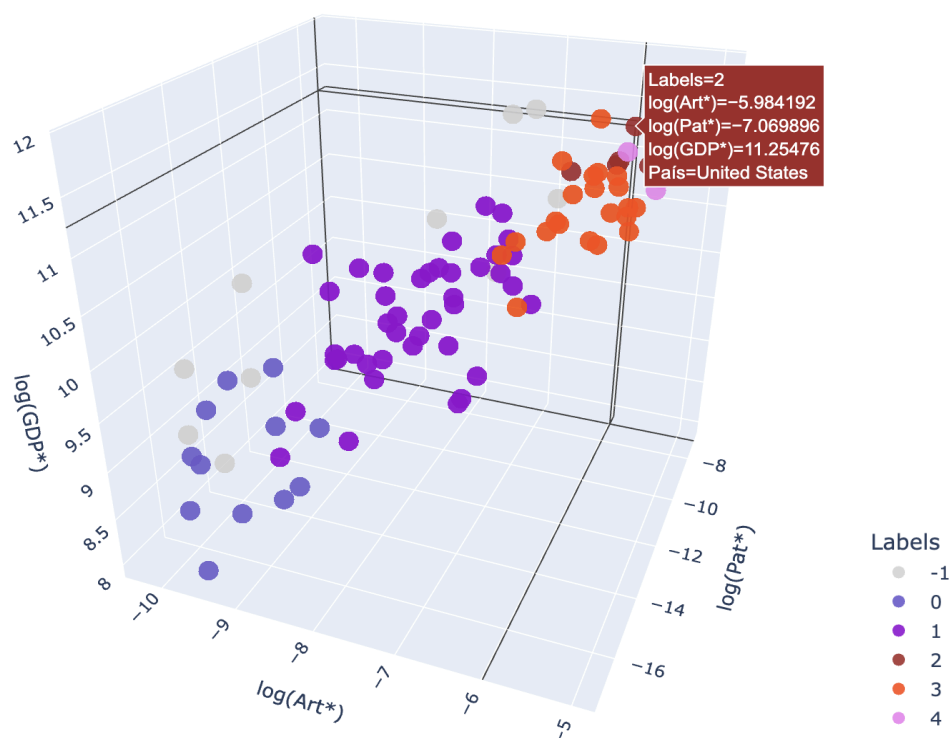
Gráfico 8 – Posição do Brasil no Modelo Atual



Fonte: Produção Própria

O **Grupo 2** representa uma mudança expressiva em relação à metodologia anterior. Com a nova clusterização, os países que antes eram considerados *outliers*, próximos das economias no Regime 3, ganham um cluster próprio. Agora, eles são notoriamente países com os sistemas de inovação mais bem integrados, nos quais a ciência e a tecnologia se retroalimentam de forma eficiente para impulsionar o desenvolvimento econômico. Esse grupo é composto por Israel, Estados Unidos, Taiwan, Coreia do Sul e Japão. A manutenção dos EUA, por exemplo, em um sistema de inovação altamente desenvolvido reforça sua posição de liderança global em inovação, destacando sua capacidade de transformar conhecimento científico em avanços tecnológicos e econômicos.

Gráfico 9 – Posição dos Estados Unidos no Modelo Atual



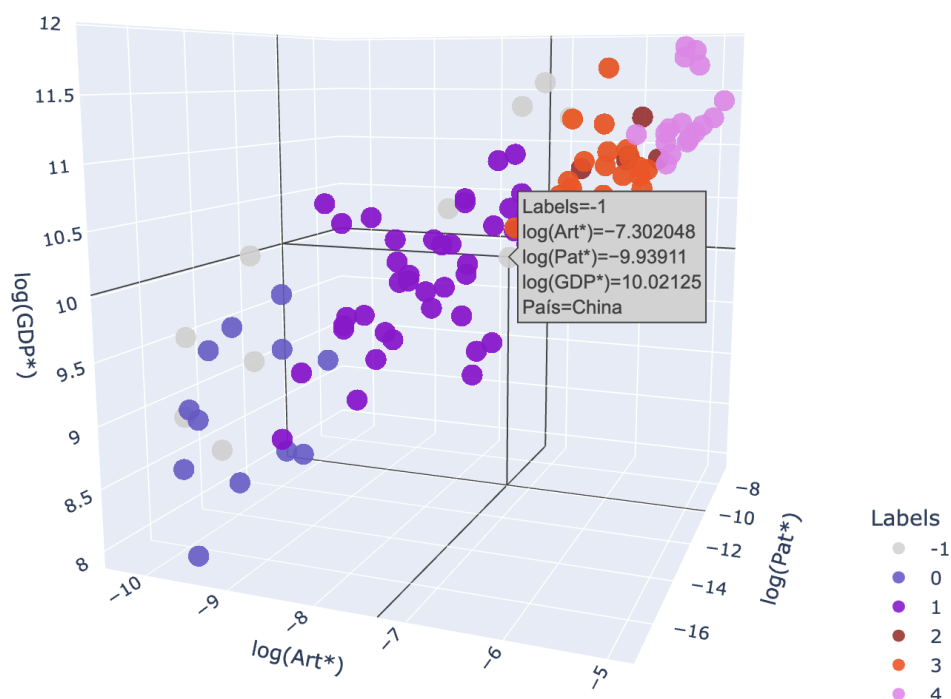
Fonte: Produção Própria

O **Grupo 3** abrange economias que, embora tenham sistemas científicos e tecnológicos sólidos, ainda apresentam algumas diferenças em relação aos países do Grupo 2. Entre eles estão Barbados, Bulgária, Chipre, Croácia, Grécia, Hungria, Letônia, Lituânia, Malta, Polônia, Qatar, Arábia Saudita, Seychelles e Emirados Árabes Unidos (antes presentes no Regime 2a); Estônia, Eslovênia, Espanha e Itália (antes presentes no grupo 2b); e França (antes presente no Regime 3). Dois países que não apareciam no estudo antigo dentro de algum dos regimes surgem agora no Grupo 3: Portugal e Ilhas Faroé.

O **Grupo 4** representa os países com os sistemas de inovação mais desenvolvidos e altamente eficientes, onde a ciência e a tecnologia estão fortemente interligadas e impulsionam o crescimento econômico de forma sustentável. Esse grupo inclui Austrália, Suíça, Dinamarca, Suécia, Singapura, Irlanda, Luxemburgo, Noruega, Islândia, Finlândia, Países Baixos, Áustria, Canadá, Bélgica, Reino Unido, Nova Zelândia e Alemanha. Esses países, apesar de terem um sistema de inovação desenvolvido, não compõem o Grupo 2, pois, de um modo geral, apresentam PIB *per capita* maior que os países deste.

Por fim, o **Grupo -1** ainda reúne países com características bastante diversas, sendo *outliers* que giram em torno de outro grupo: Venezuela, Honduras e Guatemala giram em torno do Grupo 0. Já República Dominicana, Bahamas e Filipinas estão próximas do Grupo 1. Brunei, Bermuda, China, Antígua e Barbuda e Ilhas Cayman circulam pelo Grupo 3. Aqui, vale ressaltar a posição da China, que, em 2020, estava posicionada no Regime 2a, junto a outros países em estágio intermediário de desenvolvimento, está agora próxima ao Grupo 3, que reúne países com sistemas científicos e tecnológicos bem estabelecidos, mas que ainda apresentam algumas diferenças em relação às nações mais desenvolvidas do mundo. Esse avanço reflete a contínua ascensão da China como potência global em inovação, impulsionada por investimentos expressivos em pesquisa e tecnologia (Naughton, 2018).

Gráfico 10 – Posição da China no Modelo Atual



Fonte: Produção Própria

Sendo assim, a comparação entre os dois estudos demonstra que, enquanto Nigéria e Brasil mantiveram suas posições nos respectivos grupos, a China avançou significativamente, aproximando-se das economias mais desenvolvidas. Já os Estados Unidos consolidaram sua posição de liderança, permanecendo entre os países com sistemas de inovação mais eficientes e dinâmicos. A inclusão do PIB *per capita* na nova análise possibilitou uma visão mais abrangente da relação entre desenvolvimento econômico e inovação, explicando a migração de alguns países entre os grupos. O Quadro 1 relaciona a distribuição dos países em cada *cluster* de nosso modelo:

Quadro 1 - Distribuição dos países por *cluster*

-1	0	1	2	3	4
Antígua e Barbuda	Algeria	África do Sul	Coreia do Sul	Arábia Saudita	Alemanha
Bahamas	Azerbaijão	Argentina	Estados Unidos	Barbados	Austrália
Bermuda	Bangladesh	Armênia	Israel	Bulgária	Áustria
Brunei	Camarões	Bahrein	Japão	Chipre	Bélgica
China	Gana	Belarus	Taiwan	Croácia	Canadá
Filipinas	Indonésia	Bósnia e Herzegovina		Emirados Árabes Unidos	Dinamarca
Guatemala	Iraque	Brasil		Eslovênia	Finlândia
Honduras	Nigéria	Cazaquistão		Espanha	Irlanda
Ilhas Cayman	Paquistão	Chile		Estônia	Islândia

República Dominicana	Paraguai	Colômbia	França	Luxemburgo
Venezuela	Uganda	Costa Rica	Grécia	Noruega
	Uzbequistão	Equador	Hungria	Nova Zelândia
		Geórgia	Ilhas Faroé	Países Baixos
		Guiana	Itália	Reino Unido
		Índia	Letônia	Singapura
		Jamaica	Lituânia	Suécia
		Jordânia	Malta	Suíça
		Kuwait	Polônia	
		Líbano	Portugal	
		Macedônia do Norte	Qatar	
		Malásia	Seychelles	
		Marrocos		
		Maurícia		
		México		
		Moldova		
		Montenegro		
		Namíbia		
		Omã		
		Panamá		
		Peru		
		Quênia		
		Romênia		
		Rússia		
		Sérvia		
		Sri Lanka		
		Tailândia		
		Tunísia		
		Turquia		
		Ucrânia		
		Uruguai		

6. Considerações finais

Os resultados obtidos pela pesquisa evidenciam uma correlação forte entre produção científica e crescimento da economia nacional, mas não apenas isso. Mudanças como a remodelação da metodologia de agrupamento e clusterização trouxeram diferenças significativas na posição relativa de alguns SNIs na análise produzida, a partir da inclusão de uma terceira variável, tridimensionando o modelo pelo PIB per capita junto com artigos e patentes. Portanto, essa adição pôde compreender de forma mais completa a conjuntura de desenvolvimento exposta pelo artigo a partir do acréscimo de uma variável mais sensível à renda, um forte parâmetro de desenvolvimento econômico. Desse modo, é também possível inferir que a interação entre a produção de ciência e tecnologia e seus reflexos no desenvolvimento nacional na elevação da renda mediante o crescimento econômico é determinante na maturação dos SNIs, bem como as variáveis que as representam se articulam na definição da posição do mesmo SNI na conjuntura internacional.

No novo modelo, regiões mais densas apresentam distâncias menores em relação aos seus pares, com os pontos mais concentrados. Diante disso, ainda é possível traçar uma analogia não constatada pela pesquisa, mas que confere uma reflexão interessante sobre a área de estudo: os Sistemas Nacionais de Inovação mais modernos, dinamizados, estáveis e complexos são em geral representados pelos países desenvolvidos, profundamente interligados e conectados com a economia internacional, concentrando capacidades como ciência, tecnologia e poderio econômico, pulsando em inovação e conhecimento que influencia a periferia, gerando as chamadas Revoluções Tecnológicas, que transformam radicalmente a tessitura econômica mundial sob novos paradigmas. Destes pontos concentrados emergem e irradiam a maior parte das mudanças estruturais mundiais para as áreas menos concentradas, em geral identificadas com a periferia.

Nesta nova metodologia utilizada, é possível reunir uma vasta gama de países muito diferenciados em características entre si, podendo agrupá-los apesar de sua forte heterogeneidade. O novo agrupamento feito trouxe mudanças consideráveis em relação aos clusters de trabalhos anteriores, com tendências tanto de permanência quanto de mudanças, provendo uma análise com uma variável adicional. Contudo, há claros espaços de melhoria ou adaptação do modelo e metodologia para trabalhos posteriores. Como por exemplo, o Grupo -1 de *outliers* que gravitam e circundam em torno de clusters efetivamente formados, como o Grupo 1 e o Grupo 3. A partir de uma nova forma de análise e metodologias futuras diferenciadas, a clusterização pela qual chegamos nos resultados pode ser ressignificada, podendo colocar os países *outliers* em grupos diferentes dos demais, integrá-los em grupos já existentes ou mantê-los como outliers, mas interpretando com mais clareza essa conclusão.

Dessa forma, ela fornece um panorama dos distintos estágios de desenvolvimento das economias globais, e que ainda fornece uma atualização em relação ao estudo anterior. Neste espaço temporal, sistemas de inovação distintos podem ainda ter passado por um aprimoramento, alçando-os a um patamar mais elevado na disputa balizada pela “Rainha Vermelha”, acelerando além de seus concorrentes e estando mais próximos da sobrevivência evolutiva nessa dinâmica competitiva econômica. Este fator demonstra a dificuldade progressiva de transição dos países intermediários para um grupo mais desenvolvido, apesar da passagem de pouco desenvolvido para intermediário ser mais facilitada. Tal fato ainda reitera que é necessário e importante que estudos posteriores sejam desenvolvidos, constatando ao longo tempo essas mudanças conjunturais e estruturais que podem conduzir a novos arranjos nesta disputa, da qual insights de catch-up e projetos de desenvolvimento podem ser retirados e analisados. Logo, essa transição entre clusters pode ser tanto fruto de um real desenvolvimento de seus SNIs quanto apenas uma mudança na metodologia de clusterização, ou mesmo ambos os fatores em conjunto. Investigações em artigos posteriores sobre os casos específicos destes países e seus sistemas nacionais de inovação seriam esclarecedores sobre sua transição e seu desenvolvimento, buscando compreender se estavam em outro cluster anteriormente pela ausência de uma variável ou se seu deslocamento foi causado por mudanças de maturação do seu SNI.

Todavia, apesar de avanços interessantes e que ajudam a aumentar a complexidade do arcabouço de análise, o uso de uma variável apenas quantitativa (no caso, número de artigos publicados) pode superestimar a densidade de um determinado SNI, especialmente se o mesmo for muito citado em publicações e este fato for usado como parâmetro relevante. Paralelamente, poderia também subestimar o tamanho de outro sistema nacional de inovação, levando a uma observação menos detalhada da avaliação da posição dos atores em determinados grupos. Logo, propostas de aprofundamento da metodologia podem ser absorvidas de modo a poder validar as tendências observadas e buscar apresentar um panorama mais completo sobre as posições assumidas pelos SNIs na conjuntura internacional. Como um adendo, também poderia ajudar a perceber migrações de sistemas nacionais de inovação entre os clusters, o que auxiliaria na percepção de mudanças conjunturais, como o avanço de uma potência emergente, como a China. Ademais, também há uma lacuna acerca de dados específicos, o que demonstra uma certa limitação dos dados encontrados, haja vista que não representam plenamente a totalidade da produção científica e tecnológica dos países analisados. Portanto, tal fato pode obscurecer ou minimizar a produção e o SNI de algumas nações no modelo, às quais poderiam estar em outro grupamento, por exemplo.

Da adição de novas variáveis ou remanejamento do modelo podem surgir frutos interessantes de grande valia para o prosseguimento do avanço do campo de estudos, haja vista que este é um trabalho inaugural e não acabado em si, podendo abranger incrementos de metodologia, novas fontes de dados, etc, como os seus anteriores.

Referências bibliográficas

- CHAVES, Catari Vilela *et al.* Innovation systems and changes in the core-periphery divide: notes on a methodology to determine countries trajectories using science and technology statistics. **CEPAL Review**, Nº 130, 2020.
- EDQUIST, C. “Systems of innovation: perspectives and challenges”. In: **The Oxford Handbook of Innovation**, chapter 7, 2004.
- FREEMAN, C. **Technology policy and economic performance**: lessons from Japan. London, Pinter. 1987
- FREEMAN, C. The “National System of Innovation” in historical perspective. **Cambridge Journal of Economics**, v. 19, n.1, p. 5-24, 1995
- PEREZ, C. (2010) Technological revolutions and techno-economic paradigms. **Cambridge Journal of Economics**, v. 34, n. 1, pp. 185-202.
- LUNDVALL, B.; JOSEPH, K.J.; CHAMINADE, C.; VANG, J. **Handbook of Innovation Systems and Developing Countries: Building Domestic Capabilities in a Global Setting**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing. 2009
- PRATES, B. **Revoluções tecnológicas e o catch-up da China na economia digital**. 2022. 135 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022
- RIBEIRO, Leonardo Costa et al. Science in the developing world: running twice as fast?. **Computing in Science & Engineering**, v. 8, n. 4, pp. 81-87, 2006.
- RIBEIRO, L. ALBUQUERQUE, E. O papel da periferia na atual transição para uma nova fase do capitalismo: Questões introdutórias nas mudanças da divisão centro-periferia. **Cadernos do Desenvolvimento**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 17, pp.166-186, jul.-dez. 2015
- TEIXEIRA, Aurora A. C. Evolution, roots and influence of the literature on National Systems of Innovation: a bibliometric account. **Cambridge Journal of Economics**, v. 38, n. 1, 2014
- UNITED STATES PATENTS AND TRADEMARK OFFICE. Disponível em: <http://www.uspto.gov>
- NAUGHTON, Barry. **The Chinese Economy: Adaptation and Growth**. Second Edition. ed. Massachusetts Institute of Technology: [s. n.], 2018.
- NELSON, R. (ed.) **National innovation systems: a comparative analysis**. New York, Oxford: Oxford University. 1993