



cgée

Observatório de Ciência, Tecnologia e Inovação (OCTI)

**Relatório sobre Indicador de Complexidade Científica:
metodologias e aplicações**

Observatório de Ciência, Tecnologia e Inovação (OCTI)

Relatório sobre Indicador de Complexidade Científica: metodologias e aplicações



Brasília, DF
Dezembro, 2025

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

Organização social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

Diretor-Presidente

Fernando Cosme Rizzo Assunção

Diretores

Anderson Stevens Leonidas Gomes

Caetano Christophe Rosado Penna

Geraldo Nunes Sobrinho

Supervisor

Anderson Stevens Leonidas Gomes

Observatório de Ciência, Tecnologia e Inovação (OCTI): Relatório sobre Indicador de Complexidade Científica: metodologias e aplicações. 55p.

1. Serviços de Atividade. 2. OCTI. 3. CT&I. 4. Metodologias. 5. Complexidade Científica

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

SCS Quadra 9, Torre C, 4º Andar

Edifício Parque Cidade Corporate

70.308-200 - Brasília, DF

Telefone: (61) 3424-9600

<https://www.cgee.org.br>

Todos os direitos reservados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os textos contidos nesta publicação poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que seja citada a fonte.

Referência bibliográfica: Observatório de Ciência, Tecnologia e Inovação (OCTI): Relatório sobre Indicador de Complexidade Científica: metodologias e aplicações. Brasília, DF. 2025. 55p.

Este relatório é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do 3º Contrato de Gestão CGEE – 14º Termo Aditivo. Serviço de Atividade: Observatório de Ciência, Tecnologia e Inovação. Roteiro com metodologias e aplicações do OCTI. 8.10.56.01.50.04//1.10.01.09.01.03.

Sumário

Introdução	5
1. A relevância dos indicadores de complexidade	7
2. Base de dados	9
3. Determinação dos tópicos de pesquisa	10
4. Indicadores de Complexidade Científica dos Tópicos e das Regiões	12
4.1 Método de cálculo	12
4.2 Índice de Complexidade Científica dos Tópicos (ICCT)	14
4.3 Espaço de Tópicos de Pesquisa	16
4.4 Índice de Complexidade Científica das Regiões (ICCR)	18
4.5 Complexidade Econômica e Complexidade	22
4.6 Dinâmica das Regiões no Ranking de Complexidade Científica	23
5. Análise de casos	29
5.1 Varginha	30
5.2 Porto Velho	33
5.3 Castanhal	36
5.4 Belo Horizonte	39
5.5 Cuiabá	42
5.6 Boa Vista	44
6. Indicadores de Complexidade como insumos para políticas	47
Considerações finais	49
Referências Bibliográficas	51
Anexo I	54
Forma de cálculo do ICCR e do ICCT	54

Introdução

Em 2024 foi firmada a parceria estratégica entre o Observatório de Ciência, Tecnologia e Inovação (OCTI) e a Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas, Administrativas e Contábeis de Minas Gerais (IPEAD) para o desenvolvimento de uma nova métrica de monitoramento, denominada Índice de Complexidade Científica, concluído em 2025. A métrica se inspira na abordagem de complexidade econômica, que avalia o conhecimento produtivo dos países a partir de suas exportações, considerando mais complexas as economias que produzem bens raros e diversificados (Hidalgo & Hausmann, 2009). Essa estrutura produtiva determina competitividade e potencial de crescimento (Hidalgo & Hausmann, 2009; Boschma & Balland, 2015; Petralia, Balland & Morrison, 2017), já que produtos complexos exigem amplo conhecimento (Hausmann et al., 2014), enquanto bens comuns requerem capacidades mais simples.

A lógica da complexidade foi então aplicada à ciência, substituindo exportações por publicações, de modo que regiões com produção acadêmica diversificada e em áreas pouco usuais (Funk & Owen-Smith, 2017; Guevara et al. 2016) apresentam maior complexidade científica. Para medir esse fenômeno no Brasil, utilizou-se dados de doutores da Plataforma Lattes (2019–2023) e uma metodologia inovadora de processamento de títulos, permitindo calcular índices de complexidade para tópicos de pesquisa e municípios.

A produção científica, porém, é mais concentrada geograficamente que a produção de bens, pois depende da presença de instituições de pesquisa. Além disso, sua dinâmica é cíclica, influenciada por prazos e temas de relevância, diferindo do fluxo contínuo da produção de bens e serviços. Metodologicamente, o Índice de Complexidade baseia-se na ideia de que produtos (ou tópicos) são mais complexos quando aparecem junto a muitos outros e quando são raros. Para isso, foi necessária a criação de uma classificação específica de tópicos de pesquisa, gerada por técnicas de inteligência artificial.

A complexidade científica pôde então ser calculada tanto para tópicos quanto para regiões, seguindo lógica semelhante à da complexidade produtiva. Observou-se que a relação entre complexidade científica e econômica varia conforme o território: grandes centros tendem a exibir correlação positiva, enquanto regiões menores

podem apresentar alta complexidade científica sem correspondência econômica. Os resultados oferecem subsídios relevantes para políticas de desenvolvimento científico, tecnológico e produtivo, graças ao detalhamento territorial e à ampla variedade de tópicos analisados.

1. A relevância dos indicadores de complexidade

A abordagem da complexidade econômica, que surgiu a partir de trabalhos como o de Hidalgo et al. (2007), busca explicar diferenças persistentes de desenvolvimento entre países ao identificar que nações de alta renda exportam uma maior diversidade de bens raros e intensivos em conhecimento, enquanto países de baixa renda concentram-se em produtos ubíquos e de baixa sofisticação (Britto e Romero, 2024). A estrutura exportadora funciona como um indicador das capacidades produtivas acumuladas, e diversificar a produção implica incorporar novos saberes, tecnologias e instituições. Contudo, o processo de diversificação envolve custos elevados e incerteza, pois agentes pioneiros assumem o “custo de descoberta”, criando uma assimetria entre benefícios sociais e custos privados (Hausmann *et al.*, 2014).

A literatura operacionalizou esses conceitos por meio do Índice de Complexidade Econômica (ICE) e do Espaço do Produto, que medem, respectivamente, a diversidade e a raridade das exportações e a proximidade entre bens com base em capacidades compartilhadas. Países posicionados no núcleo do espaço produtivo possuem maiores oportunidades de avançar para setores sofisticados, enquanto economias periféricas enfrentam maiores barreiras estruturais. Evidências mostram que o ICE é um forte preditor de renda, crescimento econômico, produtividade, salários e padrões ambientais mais limpos, além de favorecer reduções de desigualdade e apoiar a transição verde (Hausmann *et al.*, 2014).

A dimensão regional dessa abordagem destaca que capacidades produtivas e tecnológicas se acumulam em territórios específicos. Diversificação tende a ocorrer em atividades relacionadas, processo conhecido como “diversificação relacionada” (Frenken et al., 2007). Regiões avançam mais facilmente para setores próximos aos já dominados, enquanto barreiras tecnológicas limitam saltos para atividades distantes. A complexidade regional depende de fatores como urbanização, qualificação da força de trabalho e presença de universidades, mas seus efeitos distributivos podem ser ambíguos no curto prazo.

Medir complexidade em escala subnacional é desafiador, dada a limitação dos dados de exportações. Estudos recentes utilizam emprego e patentes como proxies da estrutura produtiva e da capacidade tecnológica (Freitas, 2019; Freitas *et al.*, 2024), indicando que regiões mais complexas apresentam maior crescimento e maior

estabilidade (Romero *et al.*, 2024). Os efeitos variam conforme o nível de desenvolvimento regional: áreas pouco complexas têm baixa probabilidade de diversificação, enquanto regiões altamente complexas exibem maior capacidade de expansão.

A abordagem também foi estendida ao campo científico ao substituir exportações por publicações. Regiões com produção científica diversificada e presença em áreas raras apresentam maior complexidade, dado que pesquisa avançada exige infraestrutura, redes acadêmicas e capital humano especializado. A complexidade científica emerge, assim, como indicador das capacidades de geração de conhecimento, essenciais à inovação e ao dinamismo produtivo. Evidências mostram que bases científicas diversificadas fortalecem sistemas produtivos e apoiam trajetórias de desenvolvimento sustentável, embora estimativas globais ainda sejam escassas (Balland *et al.*, 2020).

No Brasil, a distribuição regional da produção científica é altamente concentrada, refletindo desigualdades estruturais na alocação de universidades e infraestrutura de pesquisa. Assim, mapear a complexidade científica regional é fundamental para orientar políticas de ciência, tecnologia e inovação com foco territorial (Morais *et al.*, 2021).

Em suma, a literatura indica que diversificação e complexidade — produtiva ou científica — constituem elementos centrais para compreender desenvolvimento econômico, inovação tecnológica e desigualdades regionais. A incorporação do território na análise reforça que capacidades se acumulam historicamente e condicionam as oportunidades futuras de transformação econômica e científica.

2. Base de dados

A construção do Indicador de Complexidade Científica das Regiões (ICCR) utilizou dados da Plataforma Lattes, abrangendo todas as publicações de doutoras e doutores entre 2019 e 2023. A base foi selecionada por sua cobertura nacional, pela diversidade de áreas de pesquisa e pelo detalhamento das informações, incluindo vínculos institucionais, áreas de atuação e registros de produção científica.

Os dados foram estruturados para representar a relação entre tópicos científicos e territórios brasileiros, por meio de uma matriz que registra o número total de publicações em cada combinação de tópico e região. A unidade territorial adotada foram as regiões imediatas do IBGE, permitindo captar a dinâmica espacial da produção científica em um nível intermediário entre municípios e estados.

As publicações foram contabilizadas pela soma dos registros no período — e não pela média anual — para mitigar oscilações de curto prazo e refletir o acúmulo de conhecimento ao longo do quinquênio, aumentando a comparabilidade entre regiões, especialmente aquelas com menor continuidade de produção anual.

Como publicações em coautoria aparecem replicadas nos currículos dos autores, foi necessário realizar um tratamento para manter apenas uma versão de cada trabalho, evitando a supercontagem.

Ao final do processo, o conjunto de dados resultou em mais de dois milhões de produções científicas únicas — um volume inviável de ser analisado manualmente e que reforça a necessidade de métodos automatizados e métricas robustas como o ICCR.

3. Determinação dos tópicos de pesquisa

O primeiro passo para calcular os índices de complexidade científica consistiu em organizar milhares de publicações produzidas por pesquisadoras e pesquisadores de diferentes áreas e temas. Essa etapa é essencial para avaliar a diversidade e a raridade da produção científica de cada localidade.

Para interpretar o conteúdo dos textos dessas publicações, foi adotada a técnica de modelagem de tópicos, que identifica automaticamente os principais assuntos presentes em grandes volumes de textos. Em termos práticos, essa técnica agrupa publicações semelhantes — aquelas que compartilham palavras, conceitos ou temas — e organiza esses agrupamentos em tópicos, que funcionam como categorias temáticas amplas. Dessa forma, é possível observar o panorama geral da produção científica e identificar áreas de concentração e suas inter-relações.

A classificação dos tópicos foi realizada com o BERTopic, ferramenta de inteligência artificial que integra métodos de linguística computacional e processamento de linguagem natural para gerar agrupamentos de forma automatizada.

O processo pode ser sintetizado em quatro etapas principais, conforme apresentado no Quadro 1:

- **Representação dos textos como vetores:** Cada título é convertido em um vetor numérico que expressa seu significado. Essa representação é feita pelo modelo Sentence-BERT, capaz de compreender o contexto semântico e identificar similaridades entre textos, mesmo quando escritos de formas diferentes ou em idiomas distintos. Esse recurso é fundamental em bases multilíngues, como a da Plataforma Lattes.
- **Redução da dimensionalidade:** Como os vetores produzidos contêm centenas de dimensões, o BERTopic utiliza o método UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) para reduzir essa complexidade preservando as relações de proximidade. Assim, textos semanticamente próximos permanecem agrupados, enquanto temas distintos são afastados.
- **Agrupamento dos textos semelhantes:** Em seguida, o algoritmo HDBSCAN identifica automaticamente os grupos de textos que tratam de um mesmo tema, sem necessidade de definir previamente o número de tópicos. O modelo

detecta aglomerados naturais e separa os textos que não se ajustam bem a nenhum grupo.

- **Extração das palavras mais representativas:** Por fim, o BERTopic aplica o método c-TF-IDF para identificar as palavras mais relevantes e características de cada grupo, permitindo interpretar o conteúdo dos tópicos — por exemplo, distinguindo temas como “educação ambiental”, “doenças respiratórias” ou “engenharia de materiais”.

Com esse processo aplicado aos títulos das publicações, foram identificados 1.077 tópicos principais, representando a diversidade da produção científica de doutoras e doutores no Brasil. Para tornar esses tópicos mais compreensíveis, utilizou-se o modelo de linguagem Llama 2, que gerou automaticamente nomes descritivos para cada tópico com base nas palavras-chave e nos títulos das publicações mais representativas de cada grupo. Esse procedimento automatizou a rotulagem e permitiu a criação de descrições claras e interpretáveis para cada tema identificado.

Algoritmo:	Finalidade:	Tipo:
Sentence BERT	Criar uma representação vetorial para um texto a partir da representação das palavras que o compõem, carregando seu significado e contexto.	IA
↓		
UMAP	Reduzir a dimensão do espaço	IA
↓		
DBSCAN	Identificar agrupamento de pontos no espaço	IA
↓		
c-TF-IDF	Identificar palavras que são muito frequentes dentro do grupo mas pouco frequente entre os grupos	Álgebra tradicional

Quadro 1 – Resumo das etapas da classificação de tópicos.

Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

4. Indicadores de Complexidade Científica dos Tópicos e das Regiões

4.1 Método de cálculo

Os indicadores de complexidade científica utilizados neste estudo resultam de uma adaptação da metodologia proposta por Hidalgo e Hausmann (2009), originalmente desenvolvida para mensurar a complexidade econômica de países a partir da diversidade e da ubiquidade de seus produtos exportados. Posteriormente aprimorada por Hausmann et al. (2014) e Tacchella et al. (2012), essa abordagem consolidou-se como referência internacional para estimar o acúmulo de conhecimento produtivo em economias nacionais e regionais.

Nos últimos anos, esse arcabouço teórico vem sendo aplicado com sucesso a outros domínios, como tecnologia e inovação (Balland & Rigby, 2017; Balland *et al.*, 2019) e, mais recentemente, à produção científica (Alshamsi et al., 2018; Catalán *et al.*, 2022). Nesta nota técnica, esse mesmo princípio é empregado para analisar a produção acadêmica brasileira, com o objetivo de estimar, de forma indireta, o acúmulo de capacitações científicas das regiões e a sofisticação relativa dos tópicos de pesquisa que compõem o sistema nacional de ciência.

A metodologia parte da matriz de publicações regionais por tópico científico, utilizada para calcular dois indicadores complementares:

- **Índice de Complexidade Científica Regional (ICCR):** mensura a complexidade da estrutura científica de cada região;
- **Índice de Complexidade Científica dos Tópicos (ICCT):** estima a sofisticação relativa de cada campo de pesquisa.

Os dois indicadores são calculados de forma interdependente: a complexidade de uma região depende dos tópicos que ela publica de forma competitiva, enquanto a complexidade de um tópico depende das regiões capazes de produzi-lo. Essa interdependência constitui o núcleo da metodologia, refletindo o equilíbrio entre diversificação científica regional e raridade temática, dimensões centrais do conceito de complexidade científica.

- **Diversificação científica regional:** representa o número e a variedade de tópicos em que uma região publica acima da média nacional. Regiões

diversificadas tendem a concentrar melhores capacitações — infraestrutura de pesquisa, corpo docente qualificado, redes de colaboração, e maior acesso a financiamento — sustentando a produção em múltiplas áreas do conhecimento.

- **Raridade temática:** expressa o grau de exclusividade de um tópico científico. Tópicos raros são produzidos em poucas regiões e, usualmente, exigem capacitações altamente especializadas, como equipamentos avançados ou integração em redes internacionais. A presença desses tópicos indica maior sofisticação científica regional.

A combinação dessas duas dimensões gera uma medida sintética que não apenas quantifica o volume da produção científica, mas também avalia o nível de conhecimento, infraestrutura e capacidades necessárias para produzir em determinadas áreas. Regiões com ICCR elevado são aquelas que produzem muitos tópicos cientificamente raros; tópicos com ICCT alto são predominantemente publicados em regiões altamente diversificadas, mesmo quando seu volume absoluto não é elevado.

Importante destacar que a complexidade científica não mede a qualidade individual das publicações ou áreas específicas, mas sim o grau de dificuldade associado ao conjunto de tópicos publicados em uma localidade — o que depende das capacidades científicas, infraestrutura e instituições de apoio existentes.

Do ponto de vista empírico, essa estrutura fornece um panorama territorial das capacidades científicas do país, permitindo identificar polos de conhecimento diversificado, áreas de especialização restrita e regiões com lacunas temáticas.

Metodologicamente, o cálculo segue o método dos reflexos, que refina iterativamente a relação entre diversificação e ubiquidade até atingir índices estáveis de complexidade. Os resultados são normalizados para permitir comparações relativas entre regiões e entre tópicos, assegurando que ICCR e ICCT capturem não apenas quantidades observadas, mas também a estrutura subjacente da produção científica.

Essa metodologia tem se mostrado robusta e replicável em estudos internacionais sobre especialização tecnológica e científica, servindo como base para diagnósticos de trajetórias de desenvolvimento, políticas de inovação e planejamento regional (Balland *et al.*, 2019; Catalán *et al.*, 2022). Neste estudo, ela sustenta a construção do

Espaço de Tópicos de Pesquisa, representação visual e analítica das interconexões que estruturam a complexidade científica no Brasil.

4.2 Índice de Complexidade Científica dos Tópicos (ICCT)

O Índice de Complexidade Científica dos Tópicos (ICCT) expressa a estrutura da produção científica nacional ao identificar o grau de sofisticação e raridade de cada área do conhecimento. Tópicos com maior complexidade tendem a exigir capacitações científicas avançadas — como infraestrutura especializada, domínio técnico acumulado e integração em redes de pesquisa — o que eleva seu custo de entrada e limita sua presença a um número reduzido de regiões altamente diversificadas. Assim, quanto maior o ICCT, mais concentrada é a produção daquele tópico no território.

A Tabela 1 apresenta a distribuição dos níveis de complexidade entre os diferentes temas de pesquisa. Os resultados evidenciam uma segmentação clara entre dois grandes grupos de tópicos. Entre os 10 temas mais complexos, predominam áreas vinculadas às ciências da saúde. Esses campos, por demandarem maior densidade de conhecimento, articulação multidisciplinar e infraestrutura laboratorial avançada, tendem a se concentrar em grandes centros urbanos, onde estão instaladas as principais instituições científicas do país.

Em contraste, os 10 tópicos menos complexos são majoritariamente associados às ciências agrárias. Esses temas apresentam maior dispersão territorial e maior presença em localidades com menor diversificação científica. A partir dessa distribuição, infere-se que tais tópicos requerem capacitações relativamente mais simples e menor necessidade de equipamentos ou estruturas altamente especializadas, o que amplia sua acessibilidade para um número maior de regiões.

ID Tópico	Tópico	ICCT	Ranking ICCT
10 mais complexos			
967	Prevenção de tromboembolismo venoso	0,892	1
1024	Traumatismo Cranioencefálico	0,882	2
1065	Músculos de Fundo Pelviano	0,881	3
824	Transtorno Obsessivo Compulsivo	0,876	4
534	Transplante Renal	0,873	5
952	Dor no Ombro	0,870	6
982	Refluxo Gastroesofágico	0,868	7
580	Lupus Eritomatoso	0,866	8
507	Educação Médica no Brasil	0,864	9
667	Corrupção no Brasil	0,864	10
10 menos complexos			
222	Tomates - Cultivo e Produção	0,156	1.068
850	Seleção de Fase de Feijão	0,153	1.069
69	Soja	0,150	1.070
121	Superação de dormência em sementes	0,136	1.072
600	Cultivo de Alface	0,135	1.073
20	Gado	0,135	1.071
313	Carbono no Solo Brasileiro	0,111	1.074
56	Cultivo de Milho	0,105	1.075
186	Fertilizantes	0,085	1.076
41	Desflorestamento na Amazônia	0,000	1.077

Tabela 1 – Índice de Complexidade Científica dos Tópicos (ICCT). Média 2019-2023.

Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

Alguns tópicos se destacam nas extremidades da distribuição. No grupo de maior complexidade, aparece o tema “Corrupção no Brasil”, evidenciando que áreas das ciências humanas também podem apresentar alta complexidade científica. Esse resultado indica que tais pesquisas exigem capacitações avançadas e estão concentradas em poucas regiões com elevada diversificação científica.

Na extremidade oposta, entre os tópicos menos complexos, destacam-se “Carbono no Solo Brasileiro” e “Desflorestamento na Amazônia”. A baixa complexidade desses temas, no período analisado, pode ser interpretada positivamente: diversas regiões, inclusive aquelas com menor diversificação científica, produziram pesquisas sobre questões ambientais, possivelmente refletindo maior atenção ao aumento recente do desmatamento.

É importante ressaltar que o ICCT não avalia qualidade ou relevância das áreas, mas

sim sua ubiquidade no território. Tópicos de baixo ICCT são aqueles amplamente difundidos e presentes em regiões menos diversificadas. Nesse caso, os resultados sugerem que esses temas são frequentemente publicados em diferentes contextos institucionais — tanto em centros de pesquisa robustos quanto em regiões de menor escala e maior especialização.

4.3 Espaço de Tópicos de Pesquisa

A partir da matriz de publicações organizadas por regiões e tópicos de pesquisa, foi construída a rede denominada Espaço de Tópicos de Pesquisa, que representa como as áreas do conhecimento se relacionam territorialmente. Nessa rede, cada tópico corresponde a um nó, e suas conexões refletem a coocorrência de publicações em uma mesma região imediata, permitindo identificar padrões de especialização, interdisciplinaridade e diversificação científica.

A construção do espaço seguiu três etapas: (i) elaboração da matriz de coocorrência entre tópicos; (ii) cálculo de uma medida de proximidade temática baseada na probabilidade condicional mínima de publicação conjunta; e (iii) representação desses vínculos em um grafo não direcionado. A estrutura resultante organiza-se em um padrão centro-periferia semelhante ao observado na literatura de complexidade econômica: tópicos centrais são mais interdisciplinares e exigem maiores capacitações, enquanto tópicos periféricos refletem especializações mais restritas.

A visualização do Espaço de Tópicos de Pesquisa, apresentado na Figura 1, mostra três grupos principais, resumidos da seguinte forma:

- **Tópicos Científicos Altamente Complexos:** localizados no centro da rede e representados por tons mais quentes, como vermelho e laranja, incluem áreas como Inteligência Artificial e Políticas Públicas, Neurociência e Educação, Genética e Medicina de Precisão, Energias Renováveis e Nanotecnologia. São campos que demandam fortes capacitações científicas, elevada interdisciplinaridade e infraestrutura sofisticada.
- **Tópicos de Complexidade Intermediária:** em zonas de transição, abrangem áreas como Educação Ambiental, Saúde Pública, Agronegócio Sustentável e Computação Quântica. A área é representada por tons amarelados; e

- **Tópicos de Baixa Complexidade:** Indicado por tons azulados e esverdeados. Situados nas extremidades da rede, incluem temas como História e Cultura Afro-Brasileira, Linguística Aplicada, Turismo Comunitário e Desenvolvimento Regional.

A análise alinhada ao ICCT confirma esses padrões. Tópicos de maior complexidade concentram-se em áreas de alto conteúdo tecnológico — Física, Engenharia, Ciências Biomédicas e Inovação —, além de pesquisas em biotecnologia, nanotecnologia, inteligência artificial e materiais avançados. Esses temas tendem a ocorrer conjuntamente, ocupando o centro da rede devido às elevadas capacitações exigidas para sua produção.

Em contraste, os tópicos com menor ICCT se concentram majoritariamente em Ciências Humanas e Sociais, Educação, Direito e Meio Ambiente. Essas áreas, embora fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico, apresentam menor densidade de conexões e maior ubiquidade, refletindo menores barreiras de entrada — como custos reduzidos, menor necessidade de infraestrutura especializada e prazos de pesquisa mais curtos.

A menor complexidade desses tópicos não indica menor importância. Ao contrário, sua ampla distribuição territorial sugere capacidade instalada em diversas regiões, revelando potencial para mobilização científica em temas socialmente relevantes a custos mais acessíveis. Esses resultados evidenciam que regiões menos centrais também dispõem de infraestrutura científica capaz de sustentar pesquisas relevantes, especialmente em áreas que não dependem de laboratórios ou equipamentos avançados.

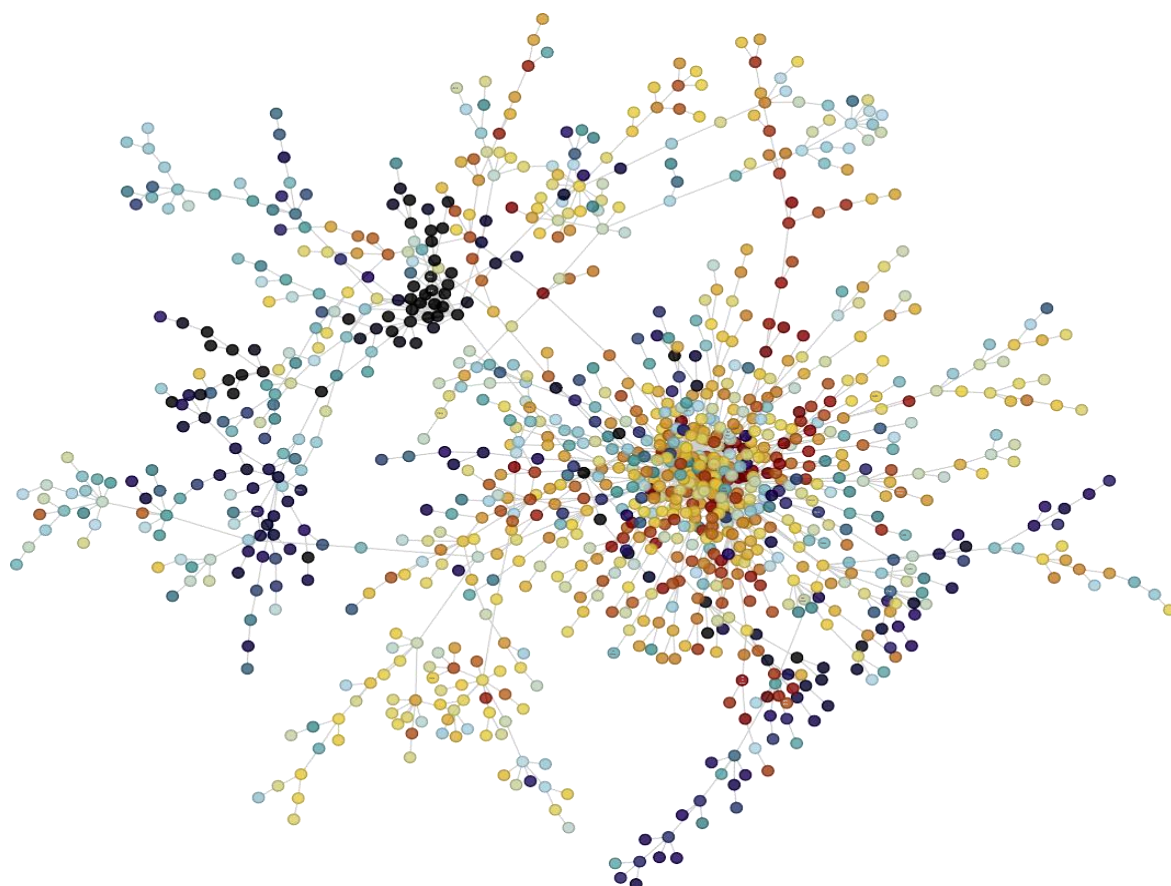


Figura 1 – Espaço de Produção Científica por nível do ICCT Médio (2019-2023).
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

4.4 Índice de Complexidade Científica das Regiões (ICCR)

A análise da complexidade científica regional no Brasil evidencia um quadro marcadamente heterogêneo, no qual o nível de sofisticação das atividades de pesquisa é influenciado por fatores históricos, geográficos e socioeconômicos. Esses elementos estruturam a dinâmica de produção intelectual e condicionam a capacidade de geração e difusão de conhecimento científico e tecnológico no território.

Os resultados do período de 2019 a 2023, apresentados na Figura 2, mostram elevada concentração do Índice de Complexidade Científica Regional (ICCR) na região Sudeste. O estado de São Paulo ocupa posição de destaque (1,00), seguido por Minas Gerais (0,63) e Rio de Janeiro (0,58). Esses valores refletem a forte densidade de universidades, centros de pesquisa e infraestrutura laboratorial avançadas presentes nesses estados.

Essa configuração reforça um padrão histórico: regiões com maior acúmulo de

recursos humanos qualificados, investimentos contínuos em ciência e tecnologia e proximidade entre instituições acadêmicas, laboratórios e atores do sistema de inovação tendem a apresentar níveis mais altos de complexidade científica. Esses fatores combinados favorecem ambientes colaborativos, aumentam a diversificação temática e impulsionam o avanço do conhecimento.

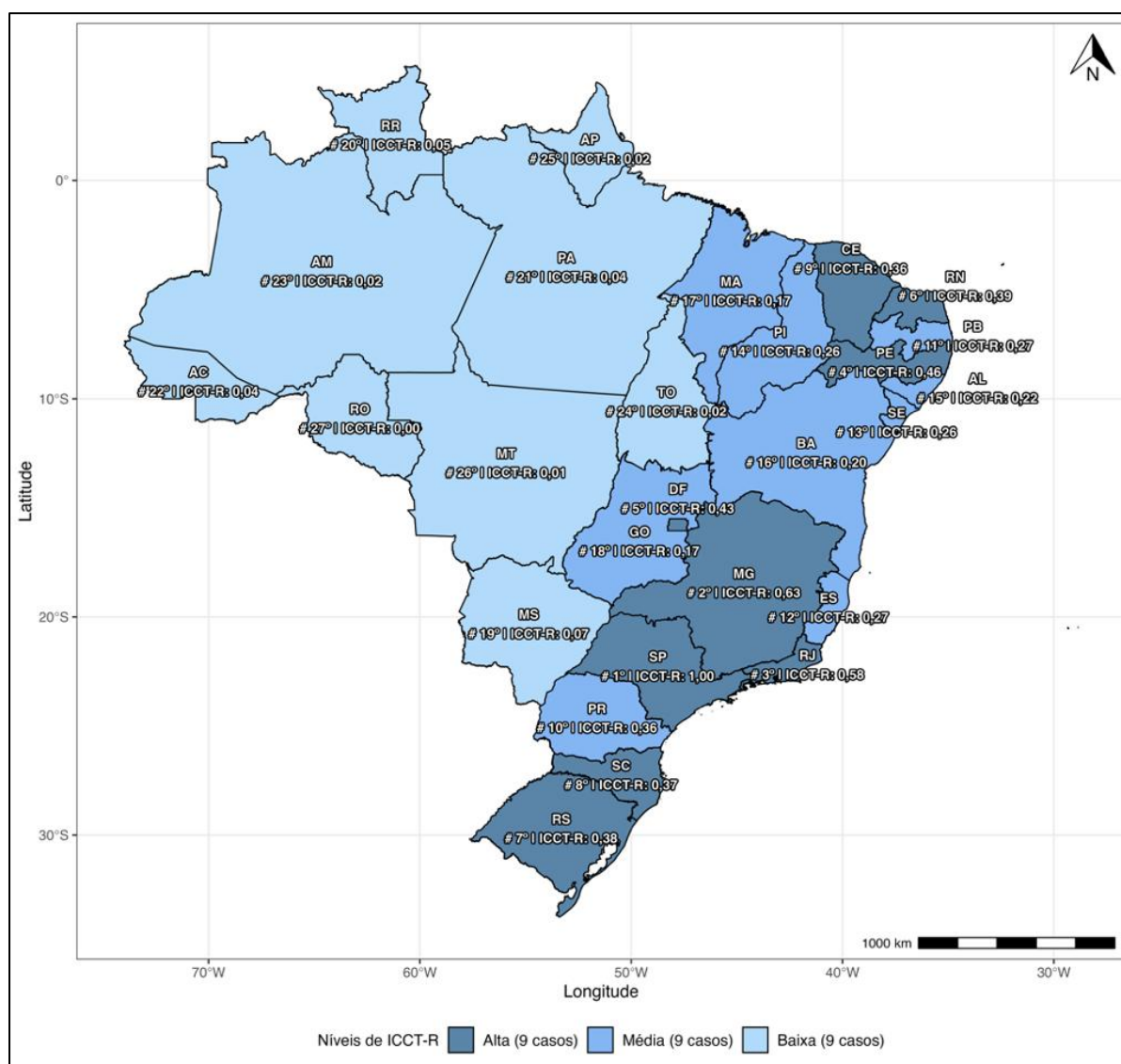


Figura 2 – ICCR dos estados brasileiros (2019-2023).

Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

No Sul, Rio Grande do Sul (0,38) e Santa Catarina (0,37) apresentam desempenho elevado no ICCR, enquanto no Centro-Oeste o Distrito Federal (0,43) se destaca como principal polo regional, com nível de complexidade científica substancialmente superior ao dos demais estados da região. Esse padrão reforça a assimetria territorial

da capacidade científica e a necessidade de políticas públicas ajustadas às condições e potencialidades de cada território.

As regiões Nordeste e Norte registram os menores índices de complexidade científica do país, com predominância de estados classificados como de baixa complexidade. No Nordeste, Pernambuco (0,46) e Rio Grande do Norte (0,39) figuram como exceções, concentrando universidades e centros de pesquisa que elevam sua posição relativa. No Norte, Roraima (0,05) e Pará (0,04) apresentam os valores mais baixos do país, evidenciando desafios estruturais na consolidação de seus sistemas científicos.

A análise estadual do ICCR reforça a importância de investimentos direcionados em infraestrutura de pesquisa, formação de recursos humanos qualificados e políticas de incentivo à ciência, especialmente nas regiões de menor complexidade. A redução das disparidades regionais é elemento central para o fortalecimento do sistema científico nacional e para o avanço de uma economia mais competitiva e sustentável.

Apesar disso, a escala estadual é insuficiente para captar a diversidade interna dos territórios. Os resultados em nível de regiões intermediárias, apresentados na Figura 3, revelam contrastes expressivos dentro dos próprios estados. Embora as regiões intermediárias paulistas mantenham níveis elevados de complexidade científica, áreas extensas do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e partes de Minas Gerais — especialmente o norte do estado — apresentam indicadores inferiores.

As regiões imediatas, por representarem recortes territoriais menores, permitem observar redes locais de colaboração. A região imediata da Grande São Paulo concentra instituições de referência, como USP e IPT, que sustentam um ambiente científico fortemente articulado com empresas e organizações do sistema de inovação. A região imediata da Grande Curitiba também se destaca pela presença de universidades e empresas de tecnologia com atuação integrada em pesquisa e desenvolvimento. De modo semelhante, a região imediata de Campinas, apoiada pela Unicamp e pelo CNPEM, e a região intermediária de Florianópolis, caracterizada por universidades e um ecossistema tecnológico ativo, exemplificam dinâmicas territoriais que ampliam a geração e circulação de conhecimento (Porter, 2008; Storper, 2013; Cooke, 2013).

Em nível municipal, a complexidade científica permanece concentrada nos grandes centros urbanos que abrigam universidades e centros de pesquisa de grande porte, como São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte, com destaque para instituições como USP, UFRJ e UFMG. Esses municípios também reúnem parques tecnológicos e incubadoras, que fortalecem a interação entre academia, empresas e governo, ampliando a capacidade local de produção científica e tecnológica (Etzkowitz & Leydesdorff, 2000).

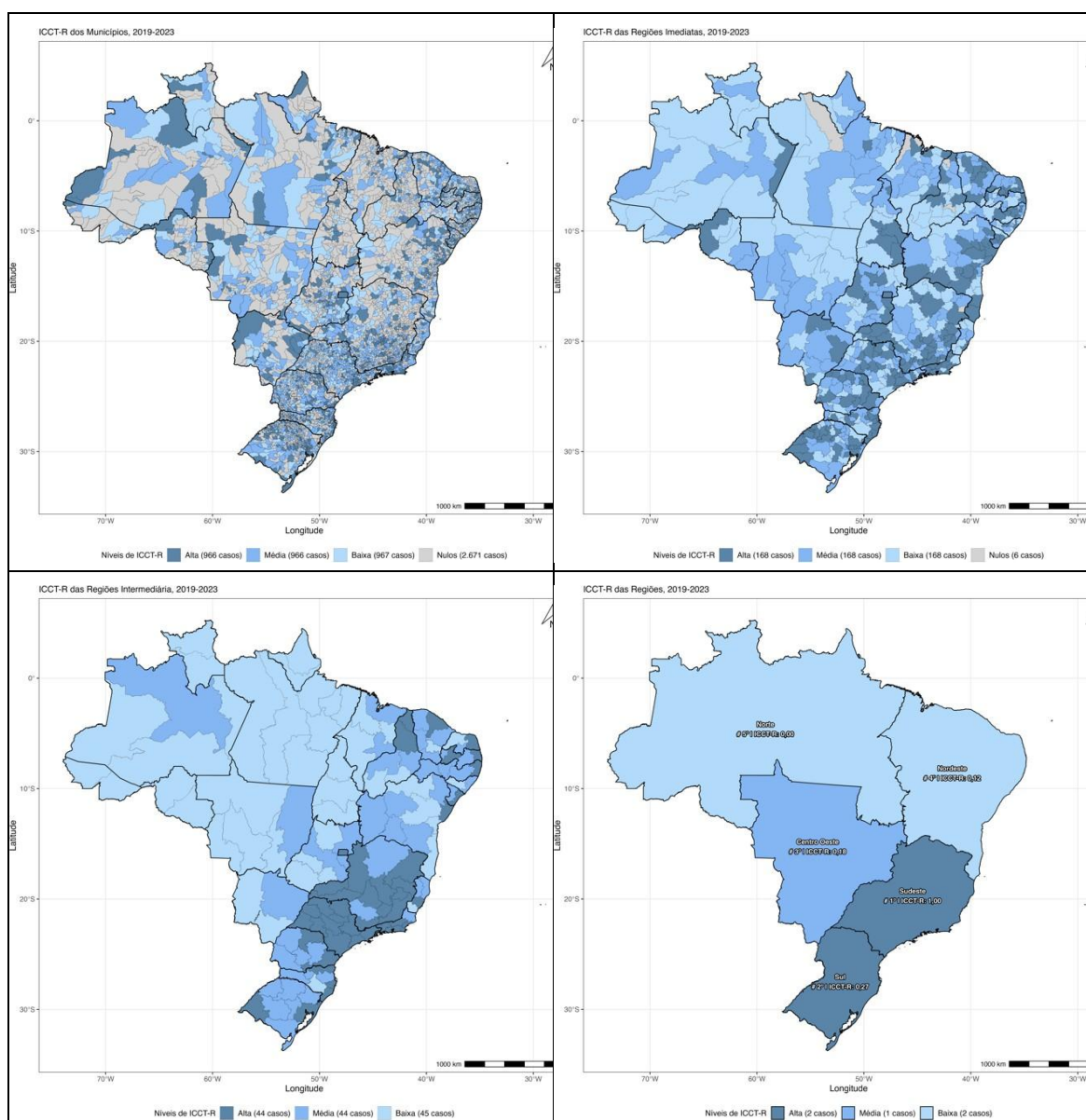


Figura 3 – ICCR das regiões brasileiras (2019-2023).
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

As regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste concentram as regiões intermediárias com os menores índices de complexidade científica. As visualizações indicam, ainda, que as desigualdades intraestaduais são tão relevantes quanto — ou, em alguns casos, mais significativas que — as diferenças observadas entre estados. Esse padrão se repete de forma consistente quando a análise é realizada em níveis territoriais mais desagregados, evidenciando a heterogeneidade interna dos sistemas científicos regionais.

4.5 Complexidade Econômica e Complexidade

Uma comparação preliminar entre o Índice de Complexidade Científica das Regiões (ICCR) e o Índice de Complexidade Econômica Regional (ICER) – que foi obtido na plataforma DataViva –, mostrado na Figura 4, permite avaliar a relação entre o conhecimento científico e o produtivo nas regiões brasileiras.

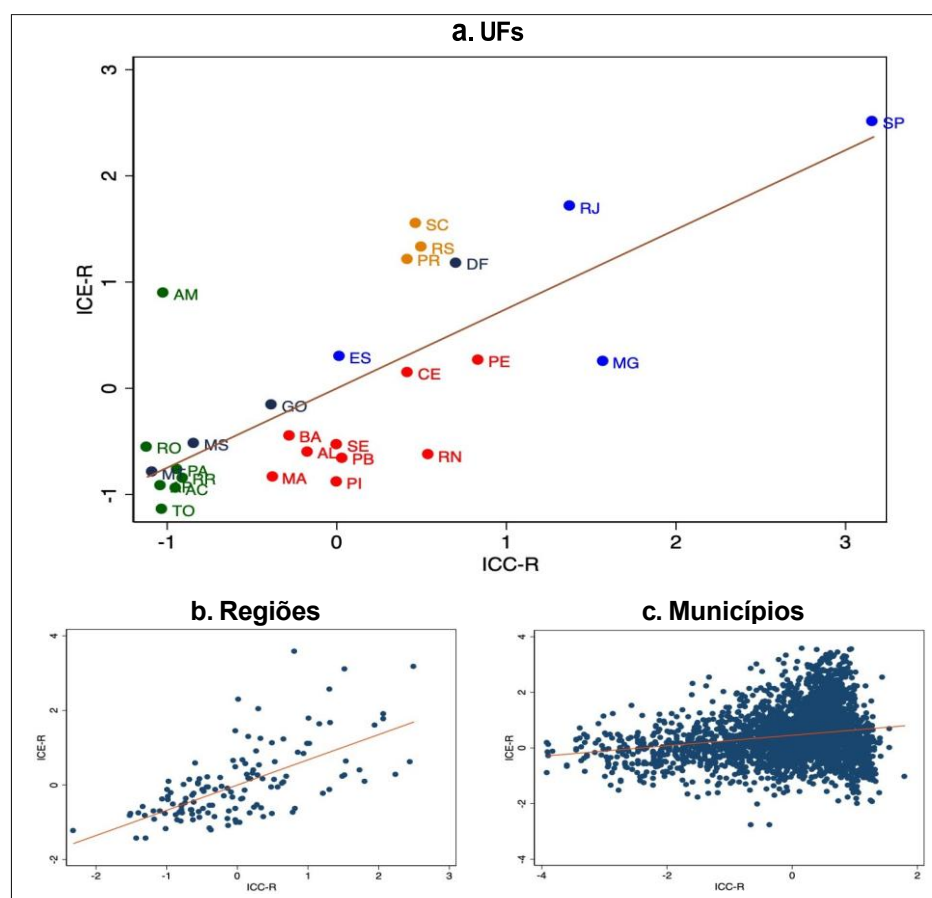


Figura 4 – Complexidade Científica (ICCR) e Econômica (ICER) das Regiões (2021).

Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

Obs: Os dados dos índices utilizados não foram normalizados para ficar entre zero e um, como apresentado neste relatório, mas sim em torno de zero, como é comum na literatura.

Os resultados da Figura 4a mostram uma relação positiva entre complexidade científica e produtiva em nível estadual: unidades federativas com maior complexidade científica também apresentam maior complexidade econômica, com correlação de 74,8% no período de 2019 a 2023. Essa associação é consistente com o entendimento de que a produção científica funciona como insumo estratégico para setores intensivos em pesquisa e com elevado conteúdo tecnológico.

À medida que a análise avança para níveis territoriais mais desagregados, essa relação se atenua. A correlação entre os indicadores cai para 64,5% nas regiões intermediárias e para 19,4% nos municípios, revelando um descompasso crescente entre ciência e estrutura produtiva em escalas locais. Esse distanciamento está relacionado à presença de universidades e centros de pesquisa em regiões com bases produtivas menos diversificadas, além da limitada integração entre academia e setor produtivo no sistema nacional de inovação.

Dada sua natureza exploratória, a análise aponta a necessidade de investigações mais robustas, com controle de variáveis e métodos econométricos adequados, para esclarecer de forma mais precisa os mecanismos que estruturam a relação entre complexidade científica e produtiva em escalas territoriais menores. Estudos adicionais podem identificar regiões onde esses indicadores convergem de maneira mais significativa, contribuindo para orientar políticas que aproximem ciência, tecnologia e desenvolvimento produtivo em âmbito regional.

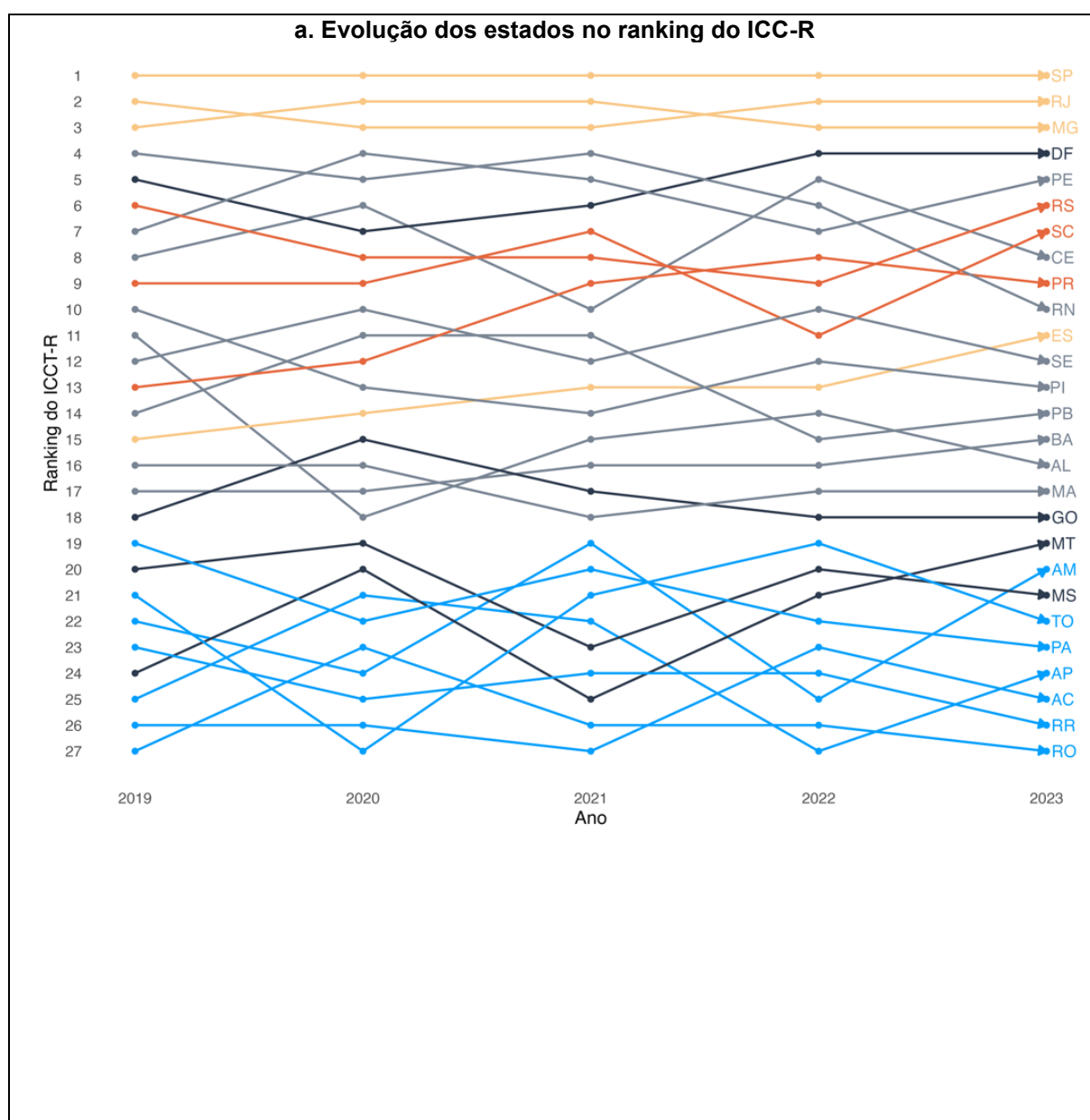
4.6 Dinâmica das Regiões no Ranking de Complexidade Científica

A evolução do ranking estadual de complexidade científica, apresentada na Figura 5, confirma sua forte associação com o nível de renda e desenvolvimento dos estados. Ainda assim, há exceções relevantes: Ceará e Pernambuco figuram entre as dez melhores posições, enquanto Bahia, Goiás, Sergipe, Pará e Amazonas aparecem abaixo do que seria esperado com base apenas em seus níveis de renda.

O ranking também demonstra elevada estabilidade em suas extremidades. Entre 2019 e 2023, os três primeiros colocados — São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais — mantiveram suas posições. Apenas três alterações ocorreram entre os dez primeiros,

destacando-se a queda do Rio Grande do Norte, do 4º para o 10º lugar, e a ascensão do Paraná, do 13º para o 9º. Na parte inferior da distribuição, Roraima, Amapá, Acre e Rondônia permanecem entre os estados com menor PIB e menor complexidade científica.

Como ilustrado na Figura 5a, mesmo diante dos impactos significativos da pandemia, os padrões de oscilação no ranking variam conforme o nível dos estados. Nas posições superiores, as variações são mais suaves devido ao maior volume e à maior estabilidade da produção científica. Nos estratos inferiores, por outro lado, pequenas mudanças no número de publicações geram flutuações proporcionalmente maiores, resultando em maior volatilidade no posicionamento.



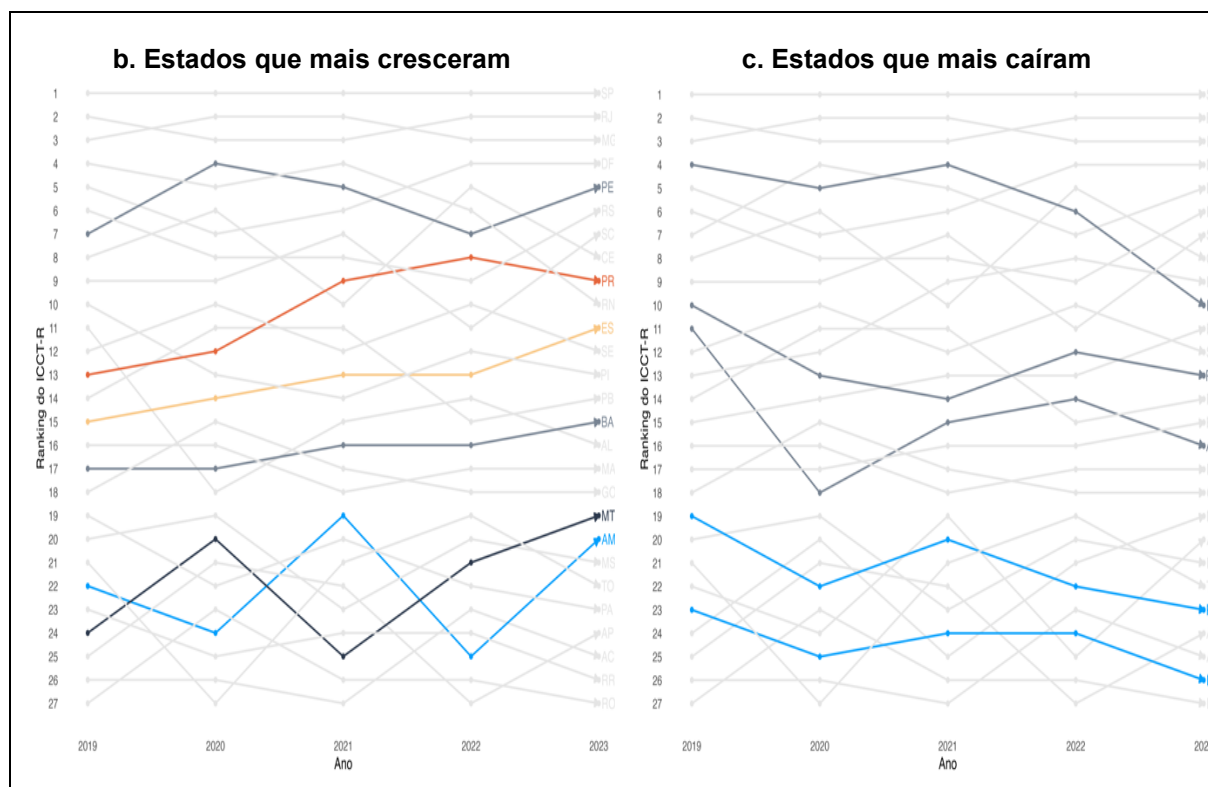


Figura 5 – Evolução dos Estados no Ranking do ICCT-R (2019-2023).

Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

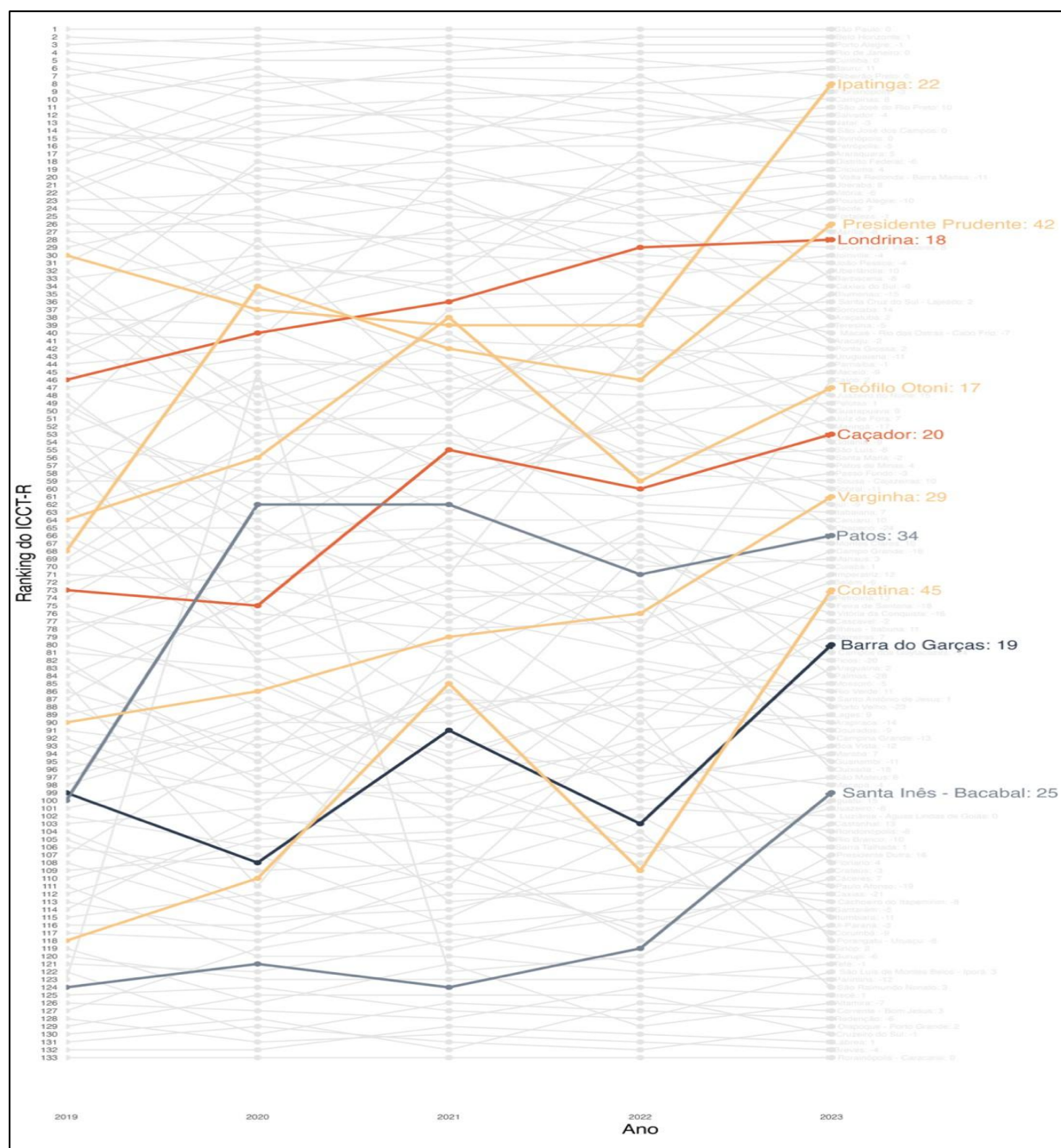


Figura 6 – Regiões Intermediárias que mais subiram no Ranking do ICCR (2019-2023).
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

Essas flutuações anuais refletem a natureza irregular da produção acadêmica, que responde a ciclos de pesquisa e a choques externos, como aqueles provocados pela Covid-19. Nos estados situados na faixa intermediária do ranking, essa volatilidade é mais pronunciada: as oscilações anuais representam uma parcela maior do total de

publicações e os fatores que afetam a produção científica incidem de maneira desigual sobre cada território, ampliando a variabilidade das posições relativas ao longo do período.

As Figuras 5b e 5c evidenciam esses movimentos, destacando os estados que mais ascenderam no ranking — Pernambuco, Paraná, Espírito Santo, Bahia, Mato Grosso e Amazonas — e aqueles que registraram as maiores perdas de posição, como Rio Grande do Norte, Piauí, Alagoas, Pará e Roraima.

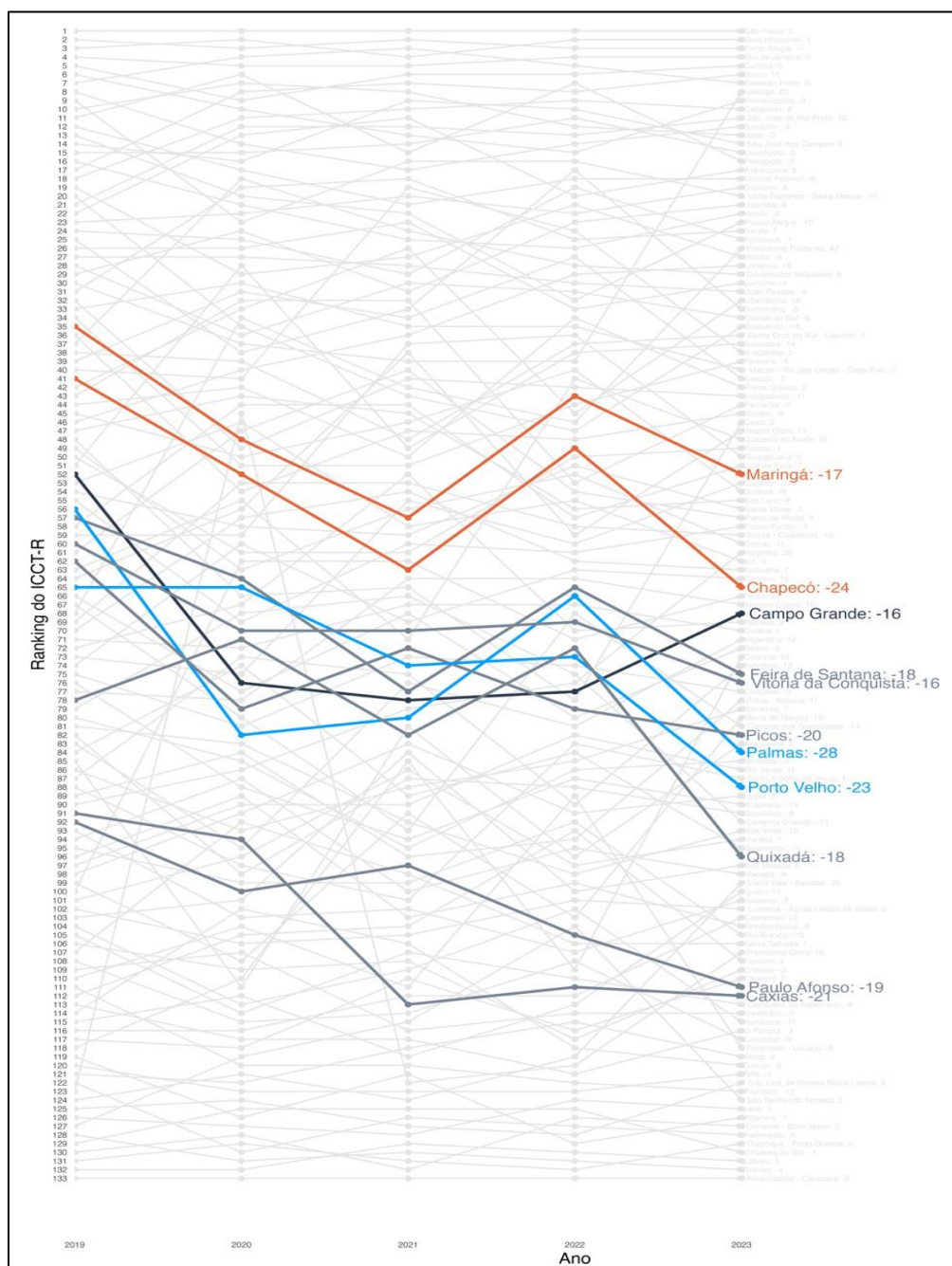


Figura 7 – Regiões Intermediárias que mais caíram no Ranking do ICCR (2019-2023).
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

Assim como na análise estadual, a avaliação das regiões intermediárias permite observar a evolução anual da complexidade científica. As Figuras 6 e 7 apresentam as trajetórias das 133 regiões intermediárias do país, destacando aquelas que registraram os maiores avanços e recuos entre 2019 e 2023.

Os resultados evidenciam que as regiões intermediárias do Norte e do Centro-Oeste apresentam desempenho relativamente mais baixo que as do Nordeste, mesmo quando incluem capitais — com exceção do Distrito Federal, que se mantém como ponto fora da curva. Nas regiões Sul e Sudeste, além das capitais, observa-se também a presença de regiões intermediárias do interior em posições de destaque no ranking, refletindo maior densidade de infraestrutura científica.

As Figuras 6 e 7 também mostram que o ranking dessas regiões apresenta elevada volatilidade anual, mesmo entre aquelas que tiveram ganhos ou perdas expressivas ao longo do período. Essa dinâmica decorre da oscilação natural da produção científica em territórios com base produtiva e acadêmica menor, reforçando a importância de séries temporais mais longas para suavizar variações conjunturais.

Diante disso, ganham relevância os casos em que o movimento de ascensão ou queda ocorre de forma consistente ao longo dos anos, como observado em Varginha e Porto Velho, que ilustram trajetórias contínuas de mudança no período analisado.

5. Análise de casos

Esta seção aprofunda a aplicação da metodologia por meio da análise detalhada de seis regiões intermediárias brasileiras — Varginha, Porto Velho, Castanhal, Belo Horizonte, Cuiabá e Boa Vista — selecionadas de forma a representar diferentes níveis de complexidade científica, padrões de diversificação e trajetórias recentes no ranking de complexidade. Os casos incluem regiões com crescimento consistente (Varginha e Castanhal), estagnação relativa (Belo Horizonte e Cuiabá), retração no desempenho comparativo (Porto Velho) e contextos periféricos com sinais iniciais de reorganização estrutural (Boa Vista).

A diversidade dos perfis analisados permite examinar como a metodologia capta dinâmicas distintas de evolução científica, considerando tanto a ampliação ou retração da base de diversificação quanto a natureza dos tópicos incorporados ou abandonados ao longo do tempo. Dessa forma, os estudos de caso funcionam como um instrumento de validação empírica da abordagem proposta, ao testar sua capacidade explicativa em contextos territoriais, institucionais e cognitivos contrastantes.

Os resultados evidenciam que aumentos no Índice de Complexidade Científica Regional (ICCR) podem decorrer de diferentes combinações entre diversificação e complexidade dos tópicos, variando conforme o estágio de desenvolvimento científico de cada região. Em regiões de menor complexidade inicial, como Castanhal e Varginha, o avanço tende a ser impulsionado prioritariamente pela expansão do portfólio temático, com posterior incorporação gradual de tópicos mais complexos. Em regiões mais maduras, como Belo Horizonte, a estabilidade do ICCR reflete a elevada complexidade já consolidada, tornando ganhos adicionais mais dependentes da entrada em domínios altamente sofisticados. Já nos casos de Porto Velho e Boa Vista, a análise revela como a perda de diversificação ou a substituição por tópicos de menor complexidade impacta negativamente o desempenho relativo, mesmo quando há forte especialização temática.

Para cada região, são apresentados: (i) a evolução da diversificação científica e do ICCR; (ii) a comparação entre a complexidade média dos tópicos de entrada e saída do portfólio competitivo; (iii) os principais tópicos de especialização segundo a Vantagem Comparativa Revelada (VCR); e (iv) a representação do Espaço de Tópicos

de Pesquisa em dois momentos do período analisado. Embora seja possível observar variações anuais, a análise privilegia indicadores médios e padrões estruturais, uma vez que a volatilidade de curto prazo da produção científica tende a ser melhor interpretada em séries temporais mais longas.

Em conjunto, os estudos de caso reforçam a robustez da metodologia ao evidenciar sua capacidade de identificar trajetórias diferenciadas, interpretar mudanças estruturais nos sistemas científicos regionais e oferecer subsídios analíticos consistentes para a compreensão dos processos de qualificação, estagnação ou regressão da complexidade científica em distintos contextos territoriais..

5.1 Varginha

A Figura 8 evidencia a expressiva evolução da diversificação científica e do ICCR de Varginha, ambos apresentando trajetória de crescimento contínuo ao longo do período analisado. A Figura 8b complementa essa leitura ao comparar o ICCR da região com a complexidade média dos tópicos nos quais Varginha passou a ser competitiva (entradas) e daqueles em que deixou de ser competitiva (saídas). Os resultados mostram que o aumento do ICCR está associado não apenas à ampliação do portfólio de tópicos, mas também à inserção em áreas cuja complexidade média supera a dos tópicos que deixaram de compor sua especialização.

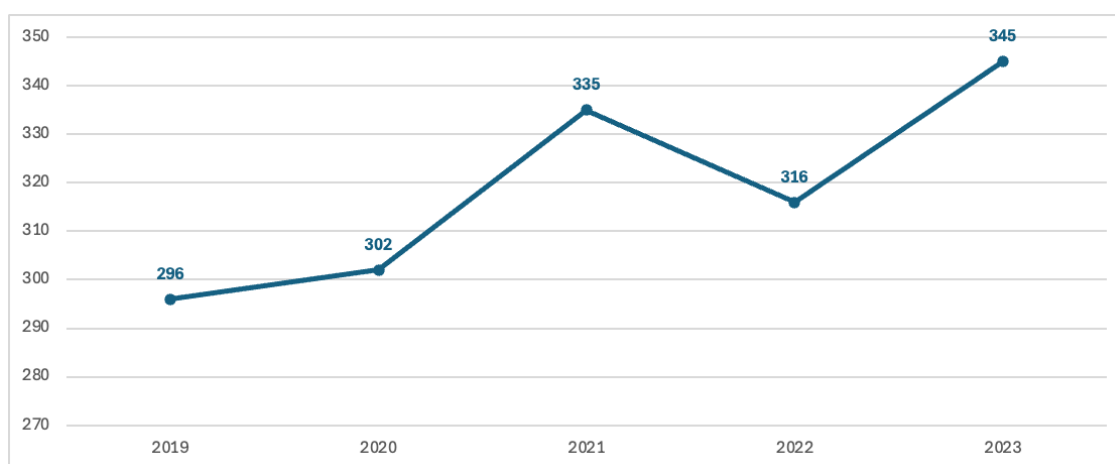
A Tabela 3 aprofunda essa análise ao apresentar os dez tópicos mais competitivos da região, medidos pelo indicador de vantagem comparativa revelada (VCR). Embora apenas o primeiro tópico — Controle de leucoptera coffeella em cultivo de café — apresente VCR expressivamente elevado, o conjunto revela baixa concentração da produção científica local. Os temas predominantes estão vinculados à agropecuária (como Solo Úmido e Resistência, Rizobactérias e Crescimento de Plantas) e à indústria extrativa (como Madeira Tropical, Eucalipto e Mineração).

Apesar da ampliação do portfólio, os dez tópicos mais relevantes de Varginha continuam apresentando níveis reduzidos de complexidade científica (ICCT inferior a 0,6), indicando que a especialização regional permanece concentrada em áreas de baixa complexidade. Assim, o avanço observado decorre predominantemente da diversificação, o que também é visível nos valores relativamente modestos de VCR.

A Figura 9 reforça essa interpretação ao representar o Espaço de Tópicos de Pesquisa da região em 2019 e 2023. Em 2019 (Figura 9a), o espaço apresenta estrutura limitada, com poucos nós e conexões concentrados em temas tradicionais das áreas agropecuária, ambiental e biológica, posicionados majoritariamente na periferia da rede. Em 2023 (Figura 9b), observa-se expansão substancial da estrutura, sobretudo na zona central, marcada por maior densidade de conexões e integração entre áreas científicas — evidência clara de diversificação e fortalecimento das capacidades de pesquisa.

Além do aumento do número de tópicos ativos, nota-se a emergência de novos clusters relacionados à saúde, educação e sustentabilidade, conectando-se aos temas já consolidados. Esses movimentos sugerem crescente interdisciplinaridade e aprimoramento das capacidades cognitivas locais, indicando que Varginha vem incorporando competências científicas mais diversificadas e reduzindo gradualmente sua dependência de tópicos de baixa complexidade.

a. Diversificação



b. Entradas, Saídas e ICCR

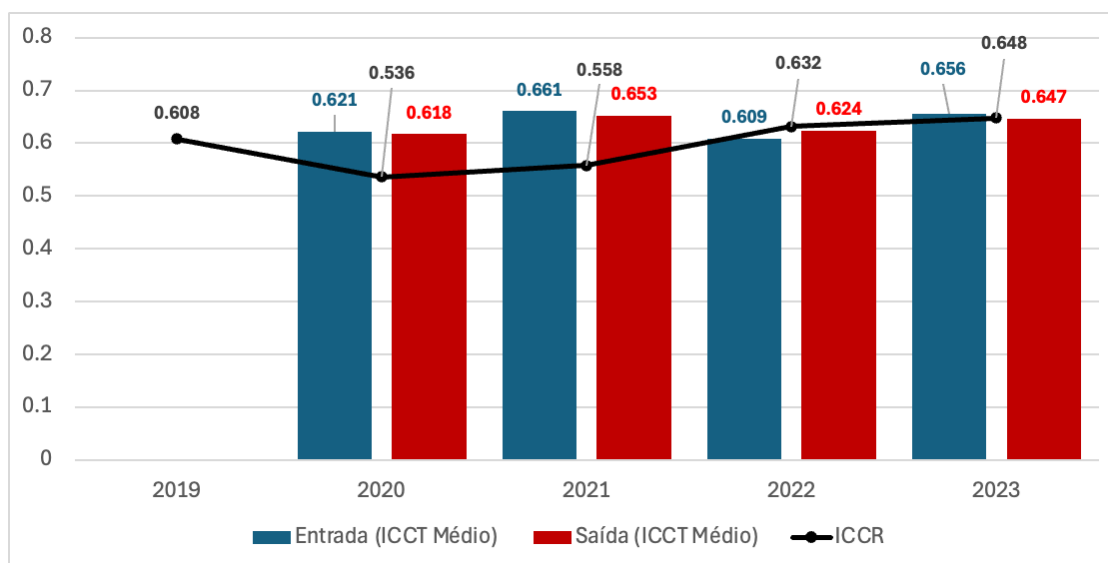


Figura 8 – Evolução da Produção Científica em Varginha.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

Tópico	VCR	ICCT	Ranking VCR
Controle de Leucoptera coffeella em cultivo de café	17.25	0.224	1
Madeira Tropical	6.22	0.187	2
Eucalipto Urophylla	5.25	0.156	3
Fungos Micorrízicos	5.23	0.215	4
Solo Úmido e Resistência	5.00	0.278	5
Intoxicação por Cádmio	4.65	0.280	6
Filmes Biodegradáveis	4.14	0.504	7
Mineração em Minas Gerais	4.11	0.381	8
Rizobactérias e Crescimento de Plantas	3.96	0.269	9
Amidos na Culinária Brasileira	3.94	0.373	10

Tabela 3 – Principais Tópicos de Especialização da Região Intermediária de Varginha.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

A evolução observada entre 2019 e 2023 indica que o sistema científico de Varginha está avançando de uma estrutura relativamente concentrada para uma configuração mais diversificada, interconectada e com maior potencial inovador. Embora o progresso ainda esteja ancorado em campos de menor complexidade relativa, o movimento consistente em direção à ampliação da base científica e ao fortalecimento das conexões entre diferentes tópicos sinaliza um processo estrutural de qualificação da capacidade regional de produção de conhecimento.

a. 2019	b. 2023
---------	---------

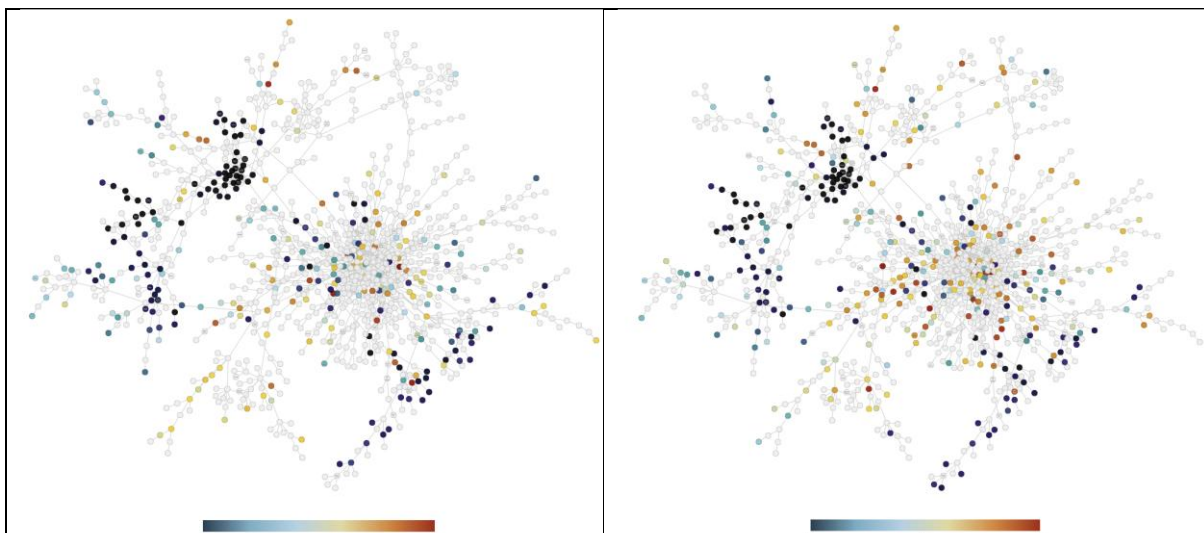


Figura 9 – Espaço de Tópicos de Pesquisa de Varginha.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

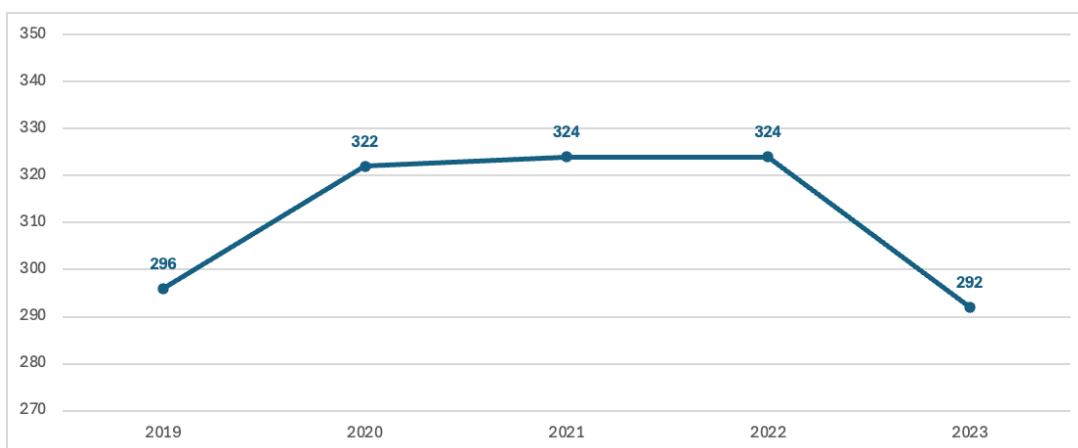
5.2 Porto Velho

A Figura 10 evidencia a trajetória de queda contínua da complexidade científica de Porto Velho ao longo do período analisado. Essa redução está associada, em anos específicos, à entrada em tópicos cuja complexidade média foi inferior à dos tópicos nos quais a região deixou de ser competitiva, como ocorreu em 2021 e 2023. Em contraste, 2022 apresentou movimento inverso: a entrada em tópicos mais complexos do que aqueles abandonados resultaram em uma leve recuperação do ICCR regional.

Embora Porto Velho e Varginha tenham iniciado o período com níveis semelhantes de diversificação, Porto Velho ocupava posição relativamente superior por apresentar especialização inicial em tópicos de maior complexidade. Entre 2019 e 2023, Varginha ampliou sua diversificação de 296 para 345 tópicos, enquanto Porto Velho atingiu 324 tópicos em 2022, mas recuou para 292 em 2023, encerrando o período com queda no ranking.

Diferentemente da trajetória ascendente observada em Varginha, Porto Velho apresentou oscilações e períodos de estagnação na sua base de diversificação científica. Assim, a queda de 23 posições no ranking não reflete uma deterioração absoluta de desempenho, mas sim um avanço mais acelerado de outras regiões intermediárias no mesmo período.

a. Diversificação



b. Entradas, Saídas e ICCR

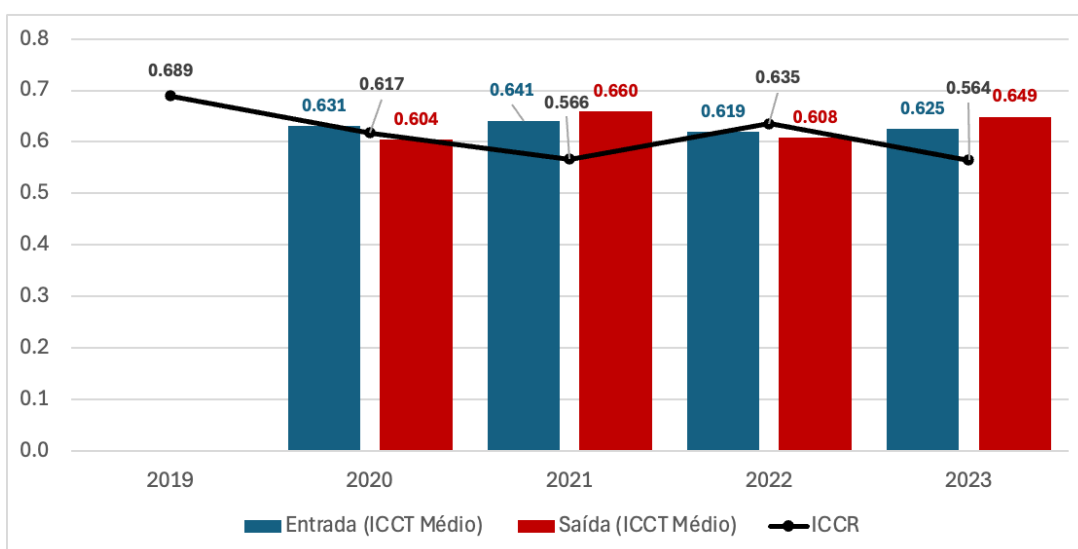


Figura 10 – Evolução da Produção Científica em Porto Velho.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

Tópico	VCR	ICCT	Ranking VCR
Desenvolvimento Sustentável na Amazônia	14.47	0.166	1
Malária causada por Plasmodium vivax	13.01	0.554	2
Contaminação por Mercúrio	12.46	0.405	3
Veneno da Cobra	11.92	0.549	4
Gestão de Bibliotecas Universitárias	10.53	0.611	5
Educação na Amazônia	10.47	0.240	6
Saúde na Amazônia	9.31	0.616	7
Povos indígenas	9.30	0.390	8
Mosca da Areia	8.91	0.556	9
Educação Indígena Escolar	8.83	0.388	10

Tabela 4 – Principais Tópicos de Especialização da Região Intermediária de Porto Velho.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

A Tabela 4 complementa as informações da Figura 9 ao apresentar os 10 tópicos de pesquisa com maior competitividade em Porto Velho, medida pelo indicador de vantagem comparativa revelada (VCR). Como um VCR acima de 1 indica competitividade, observa-se que todos os tópicos listados exibem níveis extremamente elevados, com vários deles ultrapassando o valor 10 — evidenciando uma produção científica mais de dez vezes superior à média nacional para esses temas. A especialização local concentra-se em tópicos altamente relevantes para o contexto amazônico, como Desenvolvimento Sustentável na Amazônia, Povos Indígenas, Educação na Amazônia e Educação Indígena Escolar. Destacam-se também tópicos ligados a desafios de saúde pública característicos da região, incluindo Malária, Contaminação por Mercúrio, Veneno de Cobra e Mosca da Areia. Contudo, apenas dois dos dez tópicos mais representativos — Saúde na Amazônia e Gestão de Bibliotecas Universitárias — registram ICCT acima de 0,6, ainda que apenas marginalmente. Isso indica que a maior parte das áreas de especialização da região apresenta baixa complexidade científica, contribuindo para o reduzido ICCR observado.

A Figura 11 reforça esse diagnóstico ao ilustrar o Espaço de Tópicos de Pesquisa entre 2019 e 2023: em 2019 (Figura 11a), o espaço era menos diversificado e concentrado sobretudo em saúde pública, educação e ciências sociais aplicadas, estruturado em torno de tópicos associados a políticas públicas e meio ambiente.

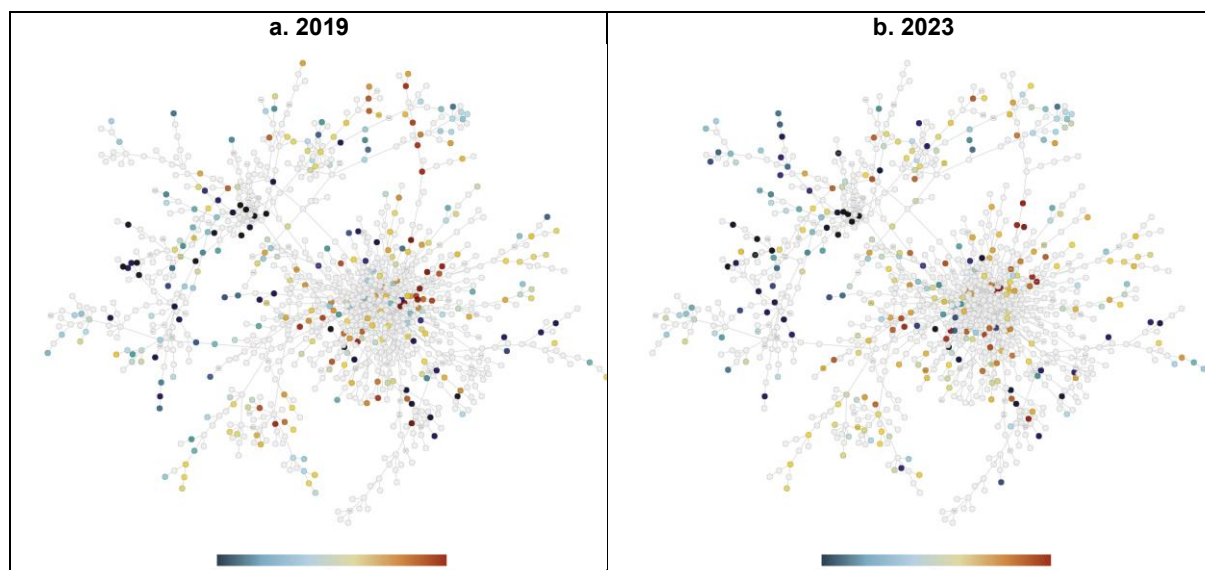


Figura 11 – Espaço de Tópicos de Pesquisa de Porto Velho.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

Entre 2019 e 2023 (Figura 11b), não se observam alterações estruturais significativas na rede científica regional. As mudanças identificadas são pontuais e insuficientes para caracterizar evolução consistente, resultando em estagnação relativa e na consequente perda de posições no ranking de complexidade científica. O padrão predominante indica que Porto Velho permanece dependente de campos de baixa e média complexidade, apesar de avanços específicos em áreas de interface, como sustentabilidade e inovação em políticas públicas.

De forma sintética, a dinâmica de Porto Velho evidencia uma trajetória de especialização centrada em temas de relevância social e forte ancoragem territorial, mas com limitada diversificação e baixa incorporação de domínios de maior densidade científica.

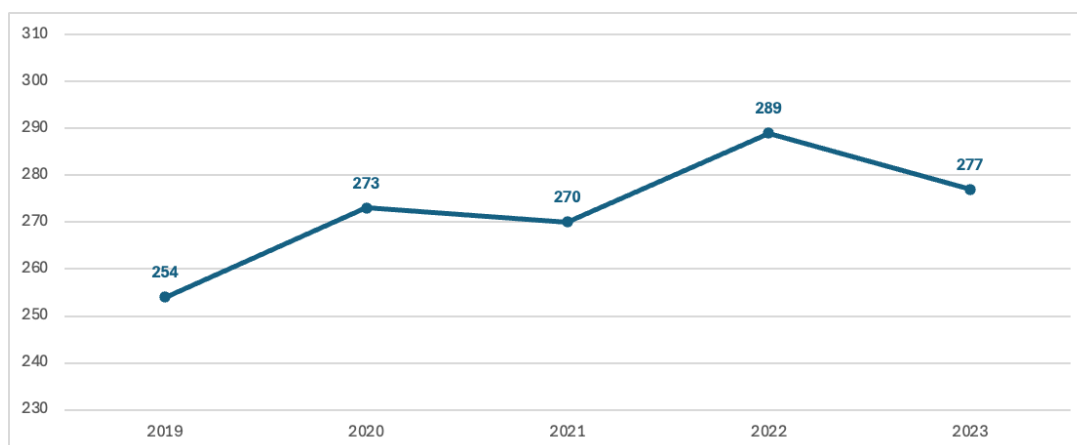
5.3 Castanhal

A Figura 12 evidencia a trajetória de aumento da complexidade científica de Castanhal entre 2019 e 2023. No período inicial (2019–2020), a região incorporou tópicos com complexidade média inferior à daqueles que deixaram o portfólio competitivo, resultando em queda do ICCR. Esse recuo, contudo, foi atenuado pelo aumento da diversificação, conforme indicado na Tabela 5.

Entre 2020 e 2021, mesmo com a continuidade da diversificação e com a entrada em tópicos de complexidade média inferior à dos que saíram, observa-se expansão do ICCR, provavelmente vinculada à incorporação de alguns tópicos de maior complexidade. Já no intervalo 2021–2022, o crescimento do ICCR decorre sobretudo do avanço da diversificação regional, apesar da entrada em tópicos com complexidade média mais baixa.

No último período (2022–2023), verifica-se o maior aumento do ICCR, impulsionado pela entrada em tópicos mais complexos do que aqueles que deixaram o portfólio, mesmo diante da redução da diversificação. O caso de Castanhal ilustra o processo típico de regiões de baixa complexidade científica: inicialmente, o ganho de diversificação exerce papel central, seguido pela progressiva inserção em tópicos mais complexos. Essa dinâmica permitiu à região avançar da 116^a para a 103^a posição no ranking de complexidade das regiões intermediárias ao final do período analisado.

a. Diversificação



b. Entradas, Saídas e ICCR

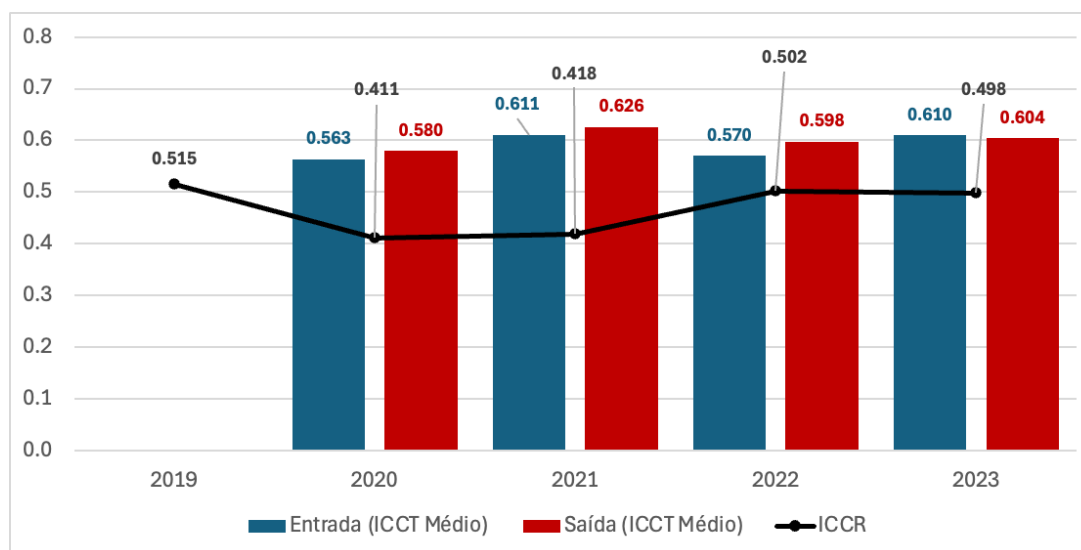


Figura 12 – Evolução da Produção Científica em Castanhal.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

Tópico	VCR	ICCT	Ranking VCR
Educação na Amazônia	11.84	0.240	1
Pesca Artesanal no Brasil	11.10	0.481	2
Mulheres na Pesca	10.20	0.543	3
Cultivo de Caraguejo	10.16	0.373	4
Produção de Peixes	9.24	0.374	5
Pescadores Artesanais	8.51	0.422	6
Navios Negreiros	8.39	0.607	7
Desmatamento na Amazônia	7.49	0.000	8
Hepatite C e B - Tratamento e Experiência	6.54	0.643	9
Consumo de Maconha	6.51	0.714	10

Tabela 5 – Principais Tópicos de Especialização da Região Intermediária de Castanhal.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

A Tabela 5 complementa a Figura 10 ao evidenciar que Castanhal mantém elevada concentração em determinados tópicos, refletida pelos altos valores de VCR. Entre os dez tópicos mais competitivos, três apresentam complexidade superior a 0,6 — Navios Negreiros, Hepatite C e B e Consumo de Maconha. Além disso, despontam temas associados à Amazônia, como Educação na Amazônia e Desmatamento na Amazônia, e tópicos ligados à pesca, incluindo Pesca Artesanal, Mulheres na Pesca, Produção de Peixes e Pescadores Artesanais.

A Figura 13 indica uma mudança estrutural relevante no sistema científico local. Em 2019 (Figura 13a), o conjunto de tópicos apresentava configuração dispersa e fragmentada, com baixa conectividade e dependência de poucos polos de produção. Em 2023 (Figura 13b), observa-se expansão substancial da rede, traduzida pelo aumento do número de tópicos e maior densidade de conexões, indicando avanço na integração temática e na articulação do portfólio científico regional.

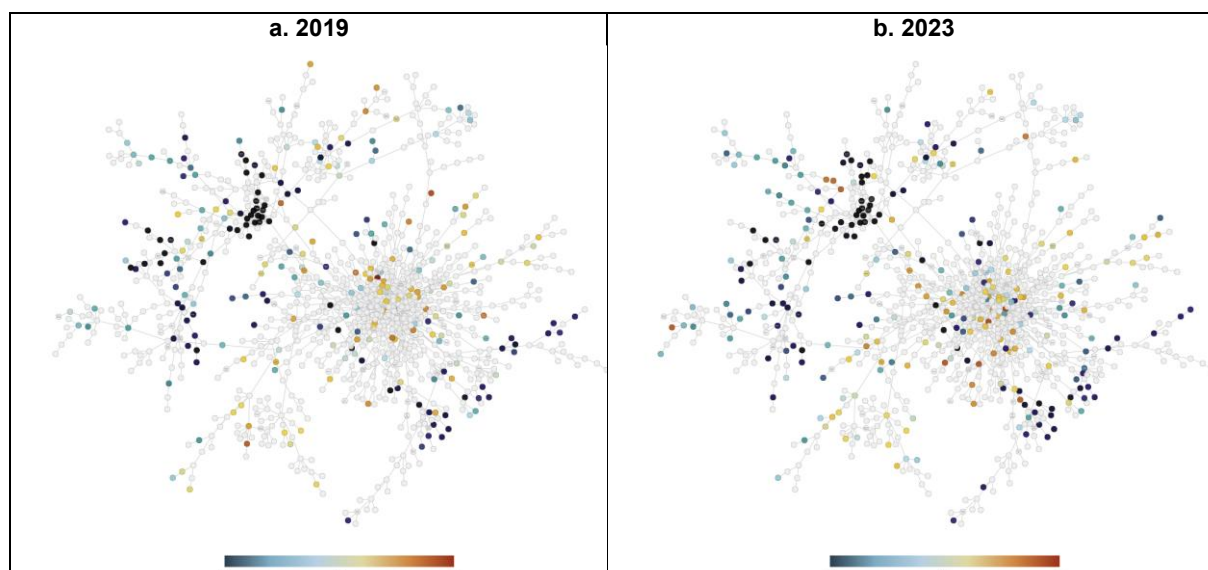


Figura 13 – Espaço de Tópicos de Pesquisa de Castanhal.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

A trajetória recente de Castanhal indica uma transição de um sistema científico especializado e periférico para uma configuração mais diversificada e articulada. Embora ainda concentrada em campos de complexidade intermediária, a região apresenta sinais consistentes de expansão temática e fortalecimento das conexões entre áreas. O aumento do ICCR e a maior integração entre tópicos sugerem um movimento gradual em direção a domínios de maior complexidade, consolidando Castanhal como um polo emergente de produção científica interdisciplinar na Amazônia. Persistem, contudo, limitações estruturais que mantêm parte da atividade científica ancorada em áreas de média complexidade.

5.4 Belo Horizonte

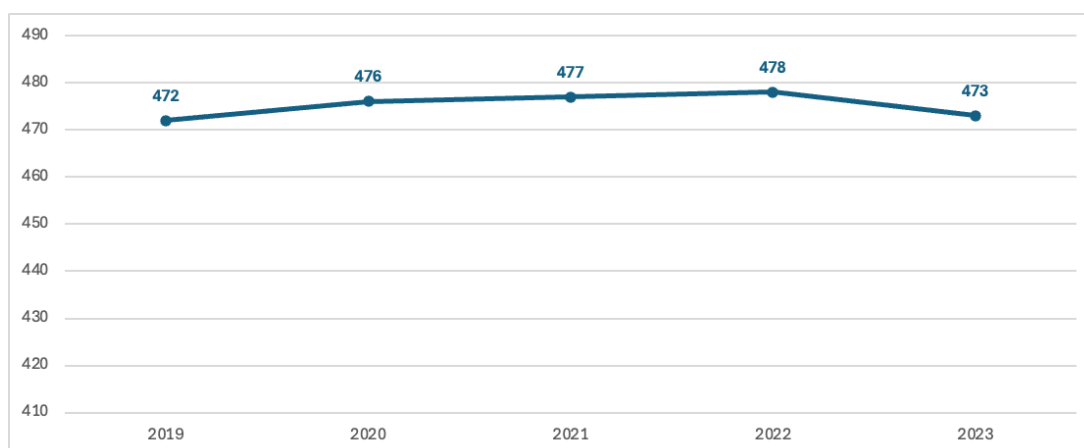
A Figura 14 indica estabilidade na complexidade científica de Belo Horizonte entre

2019 e 2023. Apesar dessa estagnação, a região avançou da 3ª para a 2ª posição no ranking nacional, reforçando sua elevada capacidade científica. Entre 2019 e 2022, a diversificação aumentou sem impacto significativo no ICCR, retornando em 2023 a níveis semelhantes aos de 2019, também sem alterar o índice. Esse comportamento sugere que a diversificação adicional ocorreu em tópicos de baixa relevância para uma região já altamente complexa.

As variações do ICCR no período refletem diretamente a diferença entre a complexidade média dos tópicos que entram e saem do portfólio competitivo: o índice cresce quando a complexidade de entrada supera a de saída, e cai no sentido oposto. A Tabela 6 reforça esse diagnóstico ao mostrar que, embora Belo Horizonte apresente VCRs menos concentrados — sinalizando maior diversificação — vários de seus principais tópicos permanecem abaixo de 0,6 de complexidade, especialmente aqueles associados à mineração. Ainda assim, a região mantém quatro tópicos acima de 0,6, incluindo temas de alta complexidade como Recuperação Empresarial e Pacientes Hemiparéticos com AVC.

A Figura 15 complementa essa análise ao mostrar que Belo Horizonte já apresentava, em 2019, um sistema científico diversificado e integrado. Em 2023, observa-se maior conectividade e ampliação do espectro temático, com o surgimento de tópicos interdisciplinares ligados à inovação tecnológica. Contudo, tais mudanças não resultam em avanços estruturais expressivos, dada a maturidade prévia do ecossistema científico regional. O conjunto das evidências indica que Belo Horizonte combina áreas consolidadas de alta densidade com frentes emergentes de pesquisa, mantendo-se como um dos principais polos científicos do país.

a. Diversificação



b. Entradas, Saídas e ICCR

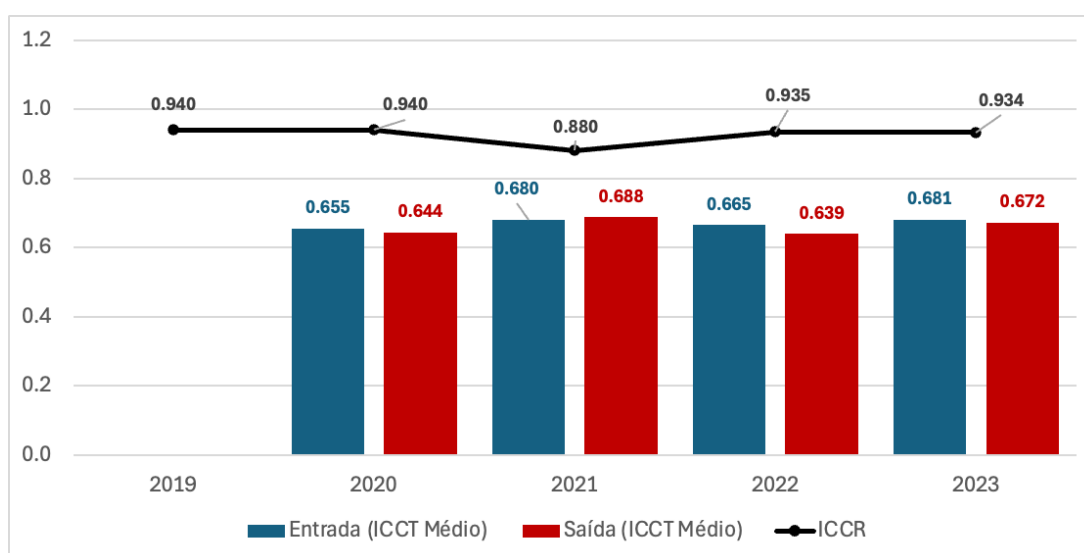


Figura 14 – Evolução da Produção Científica em Belo Horizonte.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

Tópico	VCR	ICCT	Ranking VCR
Mineração em Minas Gerais	5.32	0.381	1
Rejeitos de Minério de Ferro	4.40	0.567	2
Leishmaniose Visceral	4.34	0.518	3
Etnomatemática	4.30	0.590	4
Leishmaniose Visceral Canina	4.01	0.579	5
Schistosoma mansoni	3.64	0.636	6
Recuperação Empresarial	3.21	0.740	7
Mineração no Brasil	3.06	0.600	8
Pacientes Hemiparéticos com AVC	3.05	0.834	9
Educação em Minas Gerais	2.97	0.450	10

Tabela 6 – Principais Tópicos de Especialização da Região Intermediária de Belo Horizonte.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

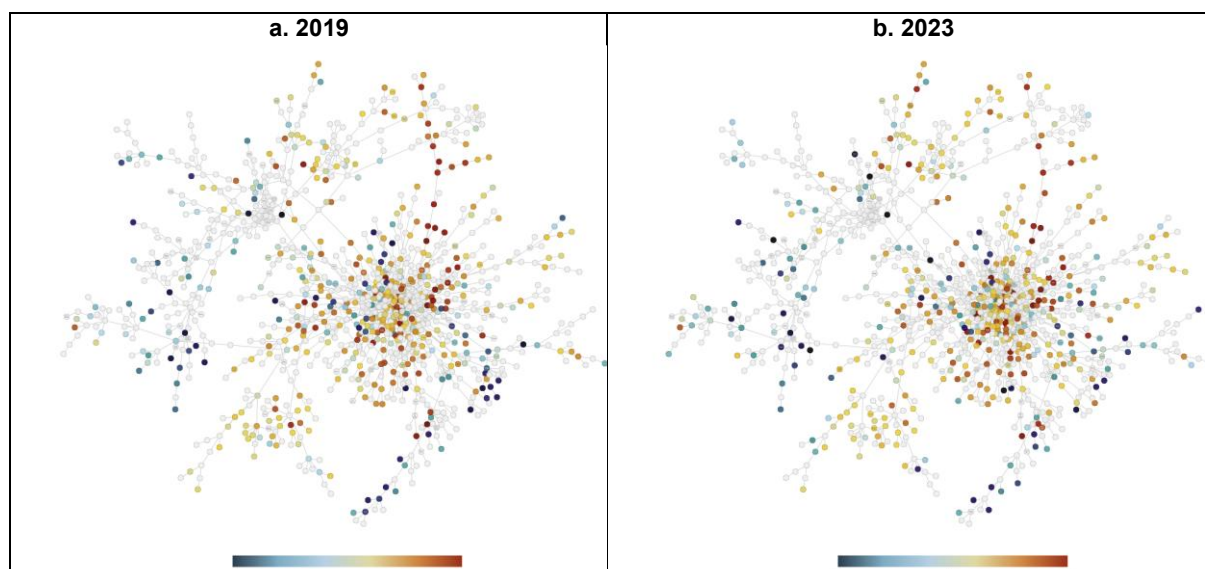


Figura 15 – Espaço de Tópicos de Pesquisa de Belo Horizonte.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

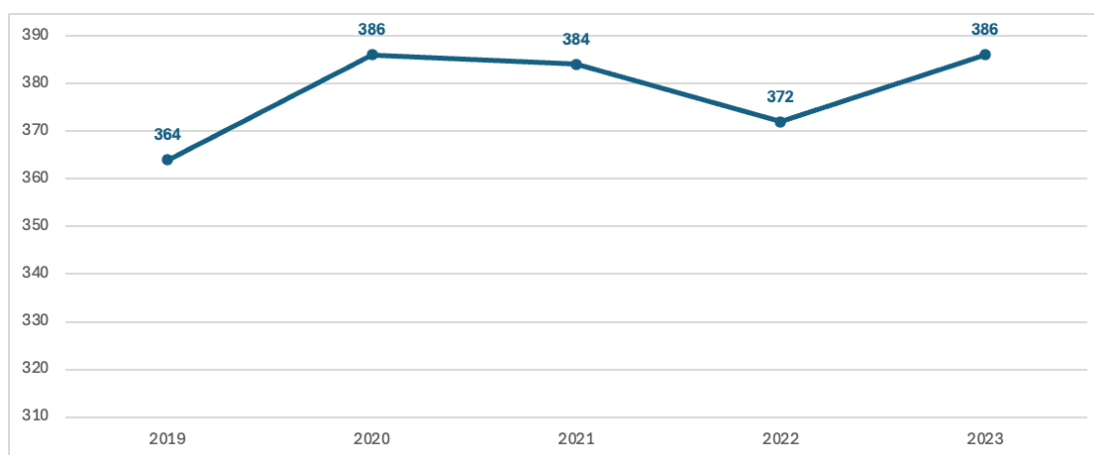
5.5 Cuiabá

A Figura 15 evidencia que, entre 2019 e 2023, a complexidade científica de Cuiabá permaneceu relativamente estável. Apesar do aumento da diversificação até 2022, a complexidade média dos tópicos que entraram e saíram do portfólio competitivo foi similar ao longo do período, resultando em variações pouco expressivas — com queda mais acentuada apenas em 2023.

A Tabela 7 mostra que, embora a região apresente diversificação superior à de áreas menos desenvolvidas, como Castanhal, seus principais tópicos competitivos permanecem concentrados em campos de baixa complexidade, com exceção de Homicídios no Brasil, Bullying e Tênis e Badminton.

Do ponto de vista estrutural, a Figura 16 demonstra que o sistema científico local evoluiu de um arranjo concentrado em áreas tradicionais em 2019 para uma rede mais conectada e interdisciplinar em 2023, com avanços em temas como biotecnologia vegetal, educação ambiental e saúde indígena. Ainda assim, essas transformações não foram suficientes para alterar o nível geral de complexidade científica da região.

a. Diversificação



b. Entradas, Saídas e ICCR

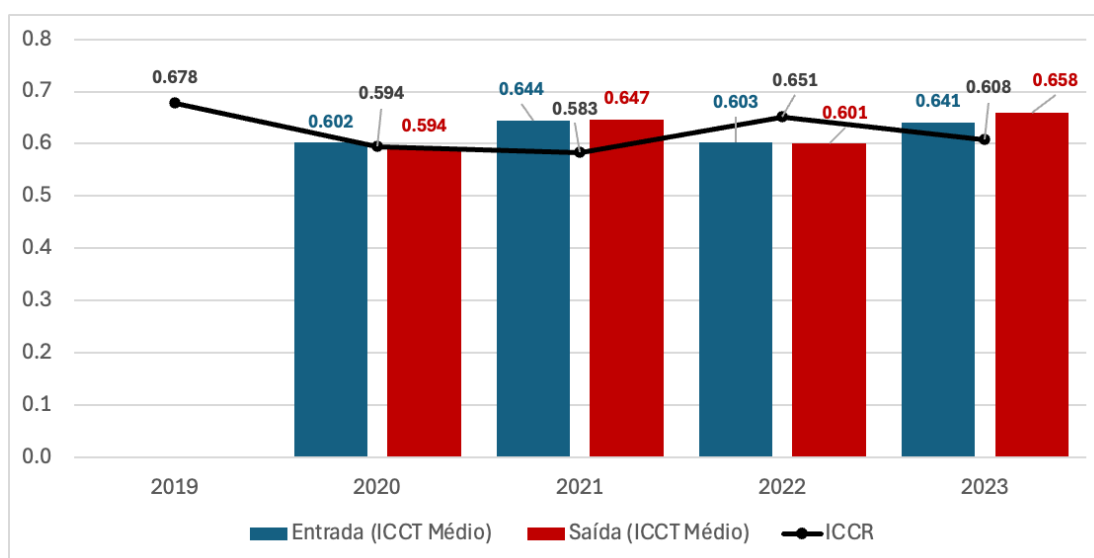


Figura 15 – Evolução da Produção Científica em Cuiabá.

Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

Tópico	VCR	ICCT	Ranking VCR
Conforto Térmico	8.857	0.472	1
Besouros de Esterco	7.186	0.442	2
Carrapatos	7.142	0.416	3
Questão Agrária no Brasil	6.195	0.511	4
Leishmaniose Visceral Canina	5.980	0.579	5
Homicídios no Brasil	4.995	0.736	6
Bullying	4.617	0.675	7
Comunidades Quilombolas	4.511	0.451	8
Tênis e Badminton	4.350	0.801	9
Incêndios Florestais	4.330	0.277	10

Tabela 7 – Principais Tópicos de Especialização da Região Intermediária de Cuiabá.

Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

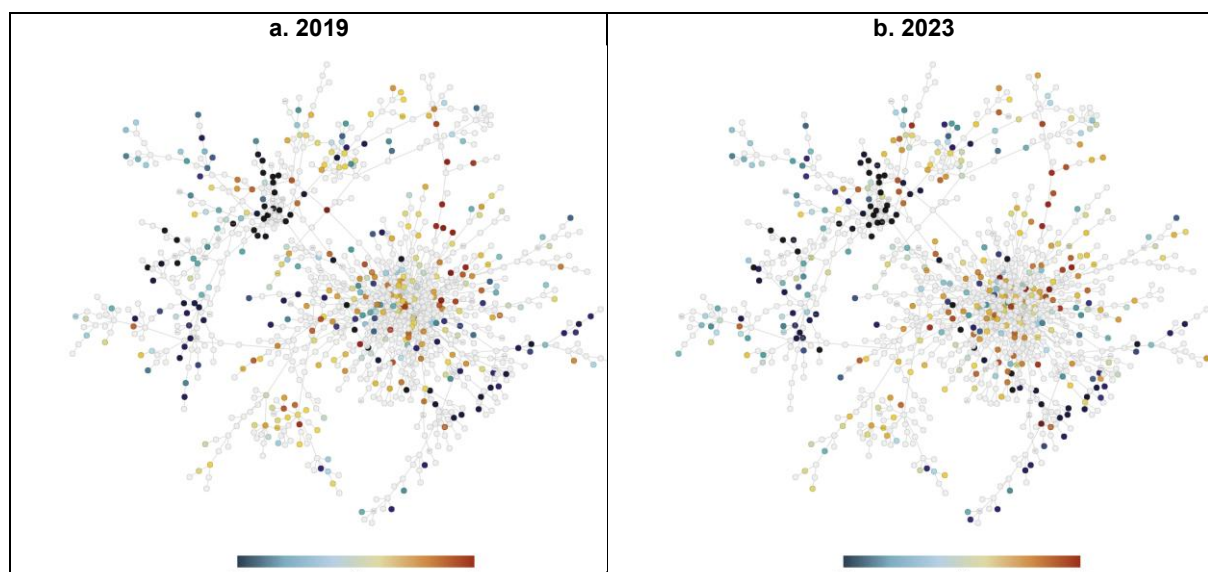


Figura 16 – Espaço de Tópicos de Pesquisa de Cuiabá.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

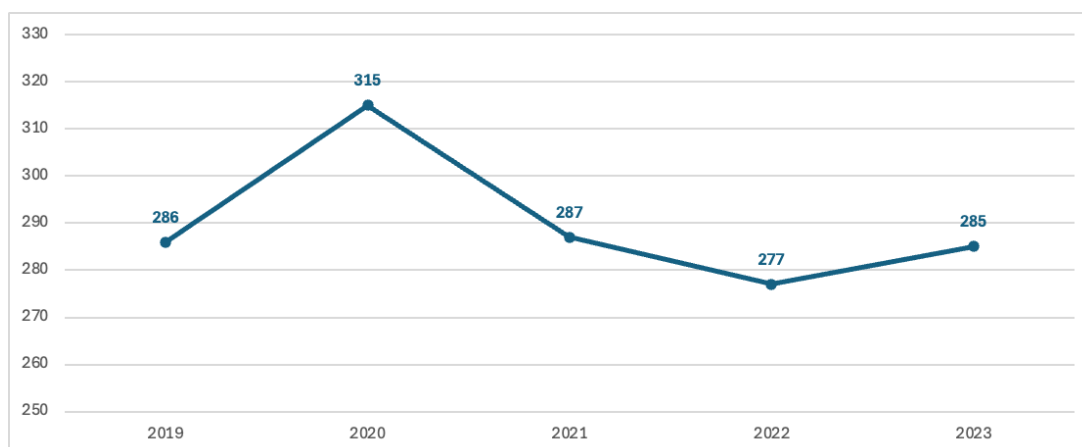
5.6 Boa Vista

A Figura 17 mostra que a diversificação científica de Boa Vista permaneceu praticamente estagnada entre 2019 e 2023. Após um aumento pontual em 2020, o índice retornou ao nível inicial em 2021 e apresentou apenas pequenas oscilações nos anos seguintes. Nesse contexto, o ICCR registra tendência de queda, influenciado pela saída de tópicos com complexidade superior à daqueles que ingressaram no portfólio competitivo da região.

A Tabela 8 indica elevada concentração temática, refletida nos altos níveis de VCR entre os 10 principais tópicos, o que confirma a baixa diversificação regional. Apesar disso, quatro desses tópicos apresentam complexidade acima de 0,6 — Refugiados Venezuelanos, Saúde Indígena, Educação Indígena e Escravidão no Brasil — majoritariamente associados a agendas regionais e às áreas de ciências humanas, com destaque para temas indígenas e educacionais.

A Figura 18 complementa o diagnóstico ao evidenciar que, em 2019, o espaço de tópicos era fragmentado e de baixa densidade, composto por poucos núcleos de pesquisa concentrados em áreas tradicionais, como educação básica, saúde coletiva, meio ambiente e formação docente.

a. Diversificação



b. Entradas, Saídas e ICCR

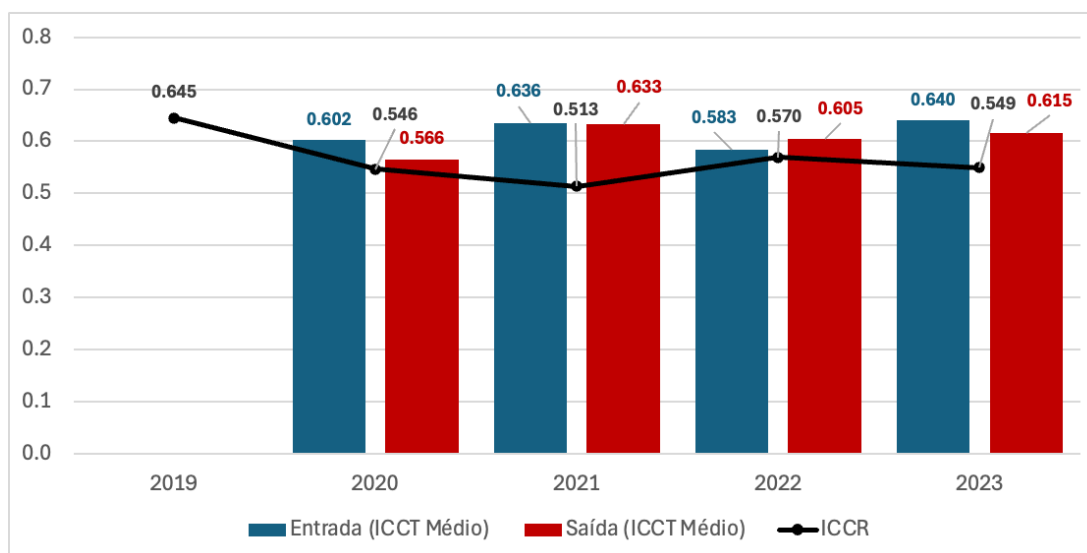


Figura 17 – Evolução da Produção Científica em Boa Vista.

Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

Tópico	VCR	ICCT	Ranking VCR
Refugiados Venezuelanos no Brasil	23.301	0.657	1
Saúde Indígena	21.061	0.635	2
Povos indígenas	14.257	0.390	3
Educação Indígena Escolar	12.265	0.388	4
Educação Indígena no Brasil	10.524	0.634	5
Mulheres Indígenas	10.241	0.570	6
Desenvolvimento Sustentável na Amazônia	10.110	0.166	7
Escravidão no Brasil	9.804	0.722	8
Educação na Amazônia	9.582	0.240	9
Alfabetização Científica para a Educação Básica	9.104	0.561	10

Tabela 8 – Principais Tópicos de Especialização da Região Intermediária de Boa Vista.

Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

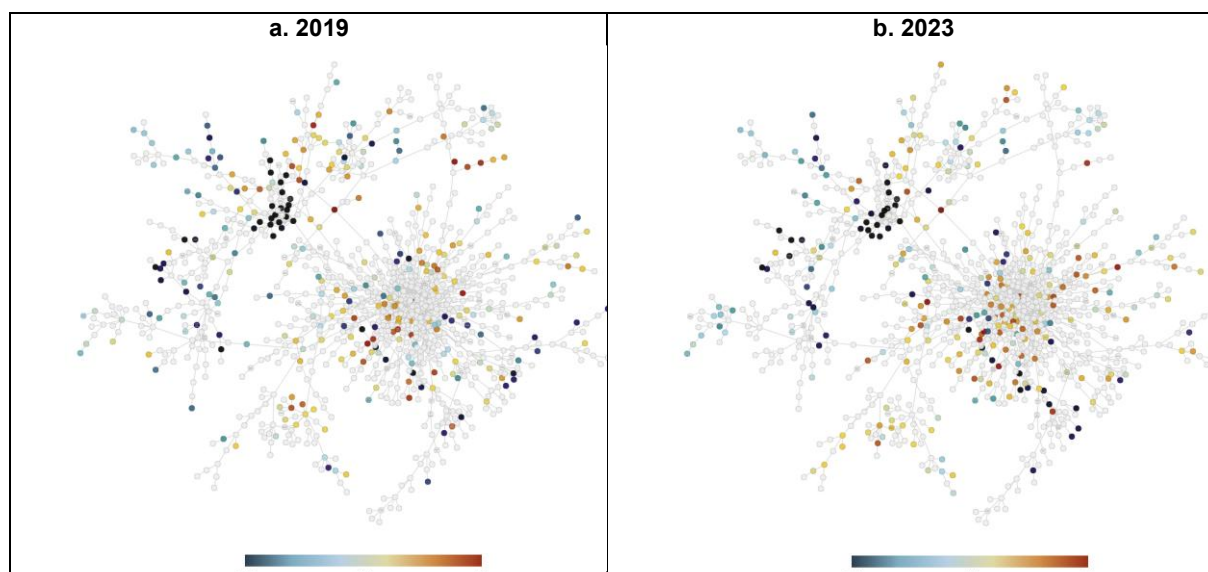


Figura 18 – Espaço de Tópicos de Pesquisa de Boa Vista.
Fonte: Elaboração própria. OCTI, 2025.

Em 2023, observa-se um aumento da conectividade na rede temática de Boa Vista, marcado pela expansão das áreas periféricas do espaço científico e pela incorporação de novos tópicos relacionados à sustentabilidade, energias renováveis, políticas públicas e tecnologias digitais aplicadas à educação e saúde. Apesar dessa ampliação, o impacto sobre a complexidade científica permanece limitado.

A evolução do sistema entre 2019 e 2023 indica uma transição de um arranjo científico periférico e concentrado para uma estrutura mais diversificada, composta por múltiplos núcleos emergentes de especialização. Embora o nível de complexidade siga moderado, o avanço na integração temática e na entrada em campos associados à fronteira tecnológica aponta para o fortalecimento gradual das capacidades regionais de pesquisa e inovação.

6. Indicadores de Complexidade como insumos para políticas

Os indicadores de complexidade vêm sendo incorporados de forma crescente ao desenho de políticas de diversificação produtiva e tecnológica inteligente (e.g. Balland *et al.*, 2019; Romero *et al.*, 2024), e abordagens semelhantes podem orientar estratégias de desenvolvimento científico.

Nesse contexto, o ICCT funciona como referência para orientar trajetórias graduais de diversificação e ingresso em tópicos de maior complexidade. Enquanto a literatura em complexidade econômica demonstra a relação entre complexidade de produtos e o crescimento da produção e do emprego (e.g. Hausmann *et al.*, 2014), no campo científico as evidências apontam sua associação ao avanço tecnológico e, por consequência, ao desenvolvimento econômico em horizontes de médio e longo prazo (Catalán *et al.*, 2022).

Assim, torna-se fundamental aprofundar a investigação sobre os efeitos da complexidade científica especialmente em regiões menos desenvolvidas, onde a desconexão entre complexidade científica e produtiva tende a ser mais pronunciada.

Os resultados apresentados mostram que as condições para expandir a produção científica variam substancialmente pelo território, exigindo alinhamento entre objetivos de política pública e capacidades locais. Alguns tópicos de alta complexidade apresentam barreiras de entrada elevadas e pouca viabilidade de expansão no curto prazo, enquanto outros oferecem oportunidades mais acessíveis, permitindo ações mais distribuídas no território.

As medidas de proximidade utilizadas na construção do Espaço de Tópicos de Pesquisa atuam como indicadores do custo de entrada em novos temas. Pelo princípio do relacionamento, tópicos próximos à base existente de competências científicas têm maior probabilidade de serem incorporados com sucesso (Hidalgo *et al.*, 2018). Assim, a combinação entre dados de proximidade e especialização científica (via VCR) permite identificar tópicos com maior potencial de inserção no processo de diversificação orientado à complexidade.

A partir desses indicadores, abre-se um conjunto amplo de possibilidades para orientar políticas científicas. Uma dessas possibilidades é o uso das métricas para estruturar instrumentos de financiamento adaptados às especializações regionais, de

modo que editais possam direcionar recursos para áreas estratégicas com maior probabilidade de consolidação local. Além disso, a produção científica já existente em temas correlatos pode ser ampliada por meio de maior interação entre localidades competitivas nesses tópicos, favorecendo a expansão da diversificação científica. Infraestruturas de transporte, comunicação e hospedagem também desempenham papel relevante ao facilitar o fluxo de pessoas e informação entre regiões com capacidades complementares.

A identificação das localidades competitivas em cada tópico abre espaço para estudos futuros sobre os fatores que explicam sua maior capacidade científica, contribuindo tanto para o fortalecimento da base científica e tecnológica quanto para sua integração com o setor produtivo — condição essencial para reduzir o descompasso entre complexidade científica e complexidade produtiva.

Por fim, indicadores de complexidade científica também podem orientar estratégias de manutenção de áreas-chave. Tópicos de baixa complexidade, como Desmatamento na Amazônia, refletem ampla presença de pesquisa em múltiplas localidades. Nesse caso, aumentos futuros de complexidade poderiam sinalizar uma redução indesejada na produção científica nacional sobre o tema. Assim, manter ou até reduzir o ICCR de determinados tópicos pode ser um objetivo legítimo de política pública, associado à preservação ou ampliação do engajamento científico em temas de interesse estratégico distribuídos pelo território.

Considerações finais

O relatório consolida o desenvolvimento e a primeira aplicação nacional do ****Índice de Complexidade Científica das Regiões (ICCR)** e do **Índice de Complexidade Científica dos Tópicos (ICCT)**, concebidos como uma nova métrica de monitoramento no âmbito da parceria OCTI–IPEAD (concluída em 2025) e ancorados na adaptação do arcabouço de complexidade para o domínio científico.

Do ponto de vista metodológico, o produto avança ao integrar: (i) uma base nacional abrangente de publicações de doutoras e doutores (2019–2023), com tratamento de duplicidades de coautoria e agregação quinquenal para mitigar oscilações de curto prazo; e (ii) uma classificação própria de tópicos, construída por modelagem de tópicos com técnicas de IA (BERTopic e componentes associados), permitindo operacionalizar a diversidade e a raridade temáticas em escala territorial.

A construção do ICCR e do ICCT, por sua vez, reforça o caráter estruturante da metodologia: os dois índices são interdependentes, pois a complexidade regional depende dos tópicos em que a região é competitiva e a complexidade do tópico depende do conjunto de regiões capazes de produzi-lo, capturando o equilíbrio entre diversificação e raridade temática. Essa interdependência é operacionalizada pelo método dos reflexos e por procedimentos de padronização/normalização que viabilizam comparabilidade entre tópicos e territórios.

No plano analítico, os resultados do ICCT revelam padrões estruturais na produção científica brasileira: temas biomédicos e interdisciplinares se associam aos maiores níveis de complexidade, enquanto tópicos mais ubíquos (com menores barreiras de entrada) tendem a aparecer em áreas como agricultura e educação. Reitera-se, como no relatório, que complexidade científica não é medida de qualidade ou relevância social, mas sim da estrutura de conhecimento subjacente e da interdependência entre domínios.

O ICCR, por sua vez, explicita a forte heterogeneidade territorial: a concentração de maior complexidade em polos com infraestrutura universitária consolidada e as desigualdades intraestaduais que se acentuam em escalas mais desagregadas, ao lado de indícios de que a interiorização do ensino superior pode ampliar a distribuição territorial da complexidade. A análise comparativa com a complexidade econômica

regional (ICER) reforça a utilidade estratégica do indicador ao evidenciar correlação elevada em nível estadual e perda de associação em escalas menores, sugerindo agendas prioritárias de investigação sobre os mecanismos de articulação (ou desarticulação) entre base científica e estrutura produtiva no território.

As aplicações empíricas desenvolvidas no relatório cumprem papel decisivo de desenvolvimento metodológico: ao testar a métrica em diferentes escalas e trajetórias, e ao aprofundar estudos de caso, a metodologia mostra capacidade de diferenciar dinâmicas (crescimento, estagnação, avanço periférico), além de apoiar interpretações orientadas por “entradas/saídas” do portfólio competitivo e por evidências estruturais no espaço temático. Do mesmo modo, a seção de usos para políticas explicita como o ICCT e o Espaço de Tópicos podem orientar trajetórias graduais de diversificação e informar o “custo de entrada” em novos temas, combinando proximidade temática e especialização (VCR) para apoiar decisões públicas.

Em linha com esse enfoque, este produto deve ser entendido como uma etapa de consolidação e validação inicial, e não como ponto final. O próprio relatório aponta direções claras de avanço metodológico, que serão fortalecidas a partir das interpretações realizadas aqui e de aplicações futuras com maior contextualização territorial: desagregação por tipo de publicação, ampliação da série temporal para captar dinâmicas de longo prazo e testes com classificações internacionais padronizadas para ampliar comparabilidade.

Por fim, o ICCR se afirma como um indicador estratégico para o OCTI por adicionar uma camada analítica que vai além do volume: ele permite acompanhar a estrutura da capacidade científica (diversificação e raridade) e suas mudanças no tempo e no território, apoiando diagnósticos e focalização de políticas. Ao mesmo tempo, seu uso ganha potência quando articulado, de forma complementar, a outras leituras e evidências já produzidas pelo Observatório, contribuindo para análises integradas de desigualdades, trajetórias e oportunidades de fortalecimento do sistema nacional de CT&I.

Referências Bibliográficas

- ALSHAMSI, A., PINHEIRO, F. L., & HIDALGO, C. Optimal diversification strategies in the networks of related products and of related research areas. *Nature Communications*, 9(1), 1328, 2018.
- BALLAND, P.-A., & RIGBY, D. The Geography of Complex Knowledge. *Economic Geography*, 93(1), 1–23, 2017.
- BALLAND, P. A.; BOSCHMA, R.; CRESPO, J.; RIGBY, D. A. Smart specialization policy in the European Union: relatedness, knowledge complexity and regional diversification. *Regional Studies*, v. 54, n. 6, p. 1-17, 2020.
- BALLAND, P. A.; BOSCHMA, R.; FRENKEN, K. Proximity and innovation: From statics to dynamics. *Regional Studies*, v. 49, n. 6, p. 907–920, 2015.
- BOSCHMA, R. Proximity and Innovation: A Critical Assessment. *Regional Studies*, v. 39, n. 1, p. 61-74, 2005.
- BOSCHMA, R.; BALLAND, P. A. Relatedness and technological change in cities: the rise and fall of technological knowledge in US metropolitan areas from 1981 to 2010. *Industrial and Corporate Change*, v. 24, p. 223–250, 2015.
- BOSCHMA, R.; BALLAND, P. A.; KOGLER, D. F. The geography of knowledge spillovers and technological relatedness. *Research Policy*, v. 44, n. 3, p. 688-699, 2015.
- BRITTO, G.; ROMERO, J. P. Desenvolvimento, mudança estrutural e complexidade econômica. In: Bastos, Carlos Pinkusfeld. (Org.). *Seminários sobre desenvolvimento e financiamento*. 1ed. Rio de Janeiro: Centro Internacional Celso Furtado de Políticas para o Desenvolvimento, p. 15-54, 2024.
- CATALÁN, E., ALETA, A., ALONSO-VILLAR, O., & MORENO, Y. Mapping the complexity of scientific knowledge. *Science Advances*, 8(23), 2022.
- COHEN, W. M.; LEVINTHAL, D. A. Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, v. 35, n. 1, p. 128–152, 1990.
- FORAY, D. From smart specialisation to smart specialisation policy. *European Journal of Innovation Management*, v. 17, n. 4, p. 492-507, 2014.

FUNK, R. J.; OWEN-SMITH, J. A dynamic network measure of technological change. *Management Science*, v. 63, n. 3, p. 791–817, 2017.

GUEVARA, M. R.; HARTMANN, D.; ARISTARÁN, M.; MENDOZA, M.; HIDALGO, C. A. The Research Space: using the career paths of scholars to predict the evolution of the research output of individuals, institutions, and nations. *Scientometrics*, v. 103, p. 1695–1709, 2016.

HAUSMANN, R., HIDALGO, C., BUSTOS, S., COSCIA, M., CHUNG, S., JIMENEZ, J., SIMOES, A., & YILDIRIM, M. A. *The Atlas of Economic Complexity*. MIT Press, 2014.

HIDALGO, C. A.; HAUSMANN, R. The building blocks of economic complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 106, p. 10570–10575, 2009.

MIAO, L.; LIU, X.; ZHANG, Y.; WANG, C.; TANG, M. The latent structure of global scientific development. *Nature Human Behaviour*, v. 6, n. 9, p. 1206-1217, 2022.

NEFFKE, F.; HENNING, M. Skill relatedness and firm diversification. *Strategic Management Journal*, v. 34, n. 3, p. 297–316, 2013.

OLIVEIRA, M. A. C.; MENDES, D. R. F.; MOREIRA, T. B. S.; CUNHA, G. H. M. Análise Econométrica dos Dispendios em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) no Brasil. *Revista de Administração e Inovação*, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 268-286, jul./set. 2015.

PEDROSO, L. A.; SOUZA, M. N. C.; SOARES, K. Atlas da complexidade econômica de Harvard. *Revista Inteligência Empresarial*, v. 1, n. p., 2021. Disponível em: <https://revista.ibict.br/p2p/article/view/6241/5877>. Acesso em: 04 fev. 2025.

PEREIRA, M. A. T.; BARROS, L. C. Expansão das universidades federais na região nordeste a partir dos anos 2000: um olhar para os pequenos e médios municípios. *Anais do VIII Encontro de Pesquisa Educacional em Pernambuco...* Campina Grande: Realize Editora, 2022.

PETRALIA, S.; BALLAND, P. A.; MORRISON, A. Climbing the ladder of technological development. *Research Policy*, v. 46, p. 956–969, 2017.

RIGBY, D. L. Technological relatedness and knowledge space: Entry and exit of US cities from patent classes. *Regional Studies*, v. 49, p. 1922–1937, 2015. RODRIK, D. The Real Exchange Rate and Economic Growth. *Brookings Papers on Economic*

Activity, p. 365–429, 2008.

ROMER, P. Endogenous technological change. *Journal of Political Economy*, v. 98, p. S71–S102, 1990.

ROMERO, J. P.; FREITAS, E.; SILVEIRA, F.; BRITTO, G.; CIMINI, F.; JAYME JR, F. G. Complexity-based diversification strategies: a new method for ranking promising activities for regional diversification. *Spatial Economic Analysis*, v. 1, p. 1-24, 2024.

ROMERO, J. P.; GRAMKOW, C. Economic complexity and greenhouse gas emissions. *WORLD DEVELOPMENT*, v. 139, p. 105317, 2021.

SIDONE, O. J. G.; HADDAD, E. A.; MENA-CHALCO, J. P. A ciência nas regiões brasileiras: evolução da produção e das redes de colaboração científica. *Ciência da Informação*, v. 28, n. 1, p. 15-32, 2016.

TACCHELLA, A., CRISTELLI, M., CALDARELLI, G., GABRIELLI, A., & PIETRONERO, L. A new metrics for countries' fitness and products' complexity. *Scientific Reports*, 2012.

Anexo I

Forma de cálculo do ICCR e do ICCT

Os dados foram organizados em uma matriz de publicações, estruturada conforme três dimensões principais:

- (i) Tópicos Científicos, representando diferentes áreas do conhecimento;
- (ii) Número de Publicações¹, dado pelo total de trabalhos publicados para o par região e tópico científico;
- (iii) Região, unidade geográfica utilizada para capturar a distribuição espacial da produção científica, foram calculadas versões do ICC-R para os seguintes níveis geográficos classificados pelo IBGE²: municípios, regiões imediatas, regiões intermediárias, estados e grandes regiões.

A estrutura da matriz de publicações é representada por:

$NP_{r,t}$ = Número de Publicações do tópico t na região r

em que:

- $NP_{r,t}$ representa a quantidade de publicações do tópico t na região r ;
- r pertence ao conjunto de regiões analisadas;
- t pertence ao conjunto de tópicos científicos identificados.

A base do cálculo é a matriz binária $M_{r,t}$ que indica se uma determinada região r possui vantagem comparativa revelada $VCR_{r,t} = \left(\frac{NP_{r,t}}{\sum_t NP_{r,t}} \right) / \left(\frac{\sum_r NP_{r,t}}{\sum_{r,t} NP_{r,t}} \right)$ em um dado tópico científico t . A definição de vantagem comparativa segue o critério de $VCR > 1$, indicando que a região publica proporcionalmente mais naquele tópico do que a média

¹ Foi testado também o uso do Número de Doutores na construção da rede. No entanto, a estrutura resultante apresentou 8.920 conexões, com um grau médio de 16,5 vizinhos, sugerindo uma rede menos densa e menos eficaz na captura das conexões entre as áreas de pesquisa (tópicos).

² As regionalizações utilizadas seguem a divisão territorial do IBGE. Foram consideradas cinco escalas geográficas: municípios (5.570 unidades), regiões imediatas (510 unidades), regiões intermediárias (133 unidades), unidades da federação (27 estados, incluindo o Distrito Federal) e grandes regiões (5 no total). Para cada nível, foram calculadas versões do Índice de Complexidade Científica Territorial – Regional (ICCT-R), permitindo a análise comparativa da complexidade científica em diferentes escalas territoriais.

nacional. A partir dessa matriz, são extraídas duas medidas iniciais: diversificação regional e ubiquidade temática.

A diversificação de uma região r , denotada por D_r , corresponde ao número total de tópicos científicos nos quais essa região apresenta vantagem comparativa revelada. É interpretada como uma proxy da variedade de competências científicas locais:

$$D_r = \sum_t M_{r,t}$$

A ubiquidade de um tópico científico t , denotada por U_t , refere-se ao número de regiões onde esse tópico é encontrado com $VCR \geq 1$. Tópicos muito ubíquos tendem a ser mais simples ou acessíveis, enquanto tópicos menos frequentes são considerados mais sofisticados:

$$U_t = \sum_r M_{r,t}$$

A partir dessas duas métricas iniciais, aplica-se o chamado Método dos Reflexos, uma abordagem iterativa proposta por Hidalgo e Hausmann (2009), que visa refinar os valores iniciais de diversificação e ubiquidade, levando em conta a qualidade das conexões entre regiões e tópicos. O método é recursivo: a complexidade de uma região depende da ubiquidade dos tópicos que ela possui, e a complexidade de um tópico depende da diversificação das regiões em que ele aparece.

As equações iterativas são dadas por:

$$D_{r,N} = \frac{1}{D_{r,0}} \sum_t M_{r,t} U_{t,N-1}$$

$$U_{t,N} = \frac{1}{U_{t,0}} \sum_r M_{r,t} D_{r,N-1}$$

Após um número suficiente de iterações (geralmente entre 15 e 20)³, o sistema converge e permite a extração de autovetores não-triviais da matriz de co-ocorrência, os quais representam os escores de complexidade. Em seguida, os valores são padronizados para gerar os índices finais. Formalmente, conforme descrito no Produto

³ Para este relatório foram realizadas 20 iterações seguindo o padrão de Hidalgo e Hausmann (2009).

3 deste projeto, substituindo $U_{t,N}$ em $D_{r,N}$:

$$D_{r,N} = \sum_{r'} \tilde{M}_{rr'} D_{r',N-2}$$

onde $\tilde{M}_{rr'} = \sum_t (M_{rt} M_{r't}) / (D_r U_t)$ e r' denota outras regiões fora r .

A equação acima é satisfeita quanto $D_{r,N} = D_{r,N-2} = 1$, que é o autovetor associado ao maior autovalor de $\tilde{M}_{rr'}$, e que é formado de uns, sendo, portanto, pouco informativa. Consequentemente, o autovetor associado ao segundo maior autovalor ($\vec{K}$) de $\tilde{M}_{rr'}$ é usado para capturar a maior parte da variância. Procedimento análogo é usado para calcular o Índice de Complexidade Científica dos Tópicos (ICCT), mas substituindo $D_{r,N}$ em $U_{t,N}$ e usando o autovetor associado ao segundo maior autovalor ($\vec{Q}$) da matriz $\tilde{M}_{tt'}$.

- ICCR (Índice de Complexidade Científica das Regiões): $ICCR = \frac{D_{r,N} - \langle D_{r,N} \rangle}{dp(D_{r,N})}$
- ICCT (Índice de Complexidade Científica dos Tópicos): $ICCT = \frac{U_{t,N} - \langle U_{t,N} \rangle}{dp(U_{t,N})}$

onde $\langle \rangle$ denota a média e dp denota o desvio padrão.

Por fim, é importante notar que os índices são inicialmente normalizados em torno de zero, adotando valores negativos e positivos.

Para melhorar a interpretação dos resultados, porém, foi realizada uma normalização max-min para que os índices passem então a variar entre zero e um.