INFORME OCTI

Panorama da Produção Científica em Inteligência Climática no BRICS Ano 7, nº 8 - abril 2026

cgee
Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação

Sobre este informe

Este informe elaborado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) por meio do Observatório de Ciência, Tecnologia e Inovação (OCTI) analisa a evolução recente da produção científica em inteligência climática no mundo, com foco na atuação dos países do Brics. A partir do mapeamento de publicações científicas indexadas na base *Web of Science* (WoS), o estudo identifica padrões de crescimento, áreas de especialização e oportunidades de cooperação internacional no campo.

A análise busca compreender como a convergência entre ciência do clima, inteligência artificial e as tecnologias energéticas têm estruturado um novo campo científico aplicado, voltado à previsão, mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Este informe busca responder às seguintes perguntas:

- Como a produção científica global em inteligência climática evoluiu nos últimos anos?
- Qual é o papel dos países do Brics na estrutura internacional dessa pesquisa?
- Em quais áreas e aplicações os países do bloco concentram suas competências científicas?
- Como a produção científica se organiza em redes e agrupamentos temáticos?
- Quais são os principais padrões de especialização e as oportunidades de cooperação científica entre os países do Brics?

Neste número

* Navegue clicando nos títulos dos capítulos

Introdução 2

1 - Estratégia metodológica 2

2 - Expansão global da pesquisa em inteligência climática 3

3 - Papel do Brics na produção científica global em inteligência climática 4

4 - Competências científicas e especializações temáticas no Brics 6

5 - Estrutura da rede de produção científica Brics 7

6 - Análise dos agrupamentos temáticos 8

Considerações finais 15

Lista de siglas e abreviaturas encontradas nesta publicação 17

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
GOVERNO DO BRASIL
DO LADO DO POVO BRASILEIRO

Introdução

As mudanças climáticas consolidaram-se como um dos principais desafios globais do século 21, exigindo capacidades científicas e tecnológicas cada vez mais sofisticadas para compreender, antecipar e mitigar seus impactos. Nesse contexto, emerge um campo interdisciplinar que articula ciência do clima, ciência de dados, inteligência artificial (IA) [acrônimo em Inglês para *artificial intelligence*] e tecnologias energéticas: a inteligência climática.

O avanço do aprendizado de máquina, a ampliação da disponibilidade de dados ambientais e o fortalecimento das infraestruturas de supercomputação têm ampliado, significativamente, as capacidades de modelagem e previsão climática em escala global. Essas transformações têm impulsionado o desenvolvimento de métodos analíticos voltados à produção de diagnósticos, previsões e soluções tecnológicas associadas à adaptação climática e à transição energética.

Nesse cenário, os países pertencentes ao bloco do Brics têm assumido papel crescente na produção científica relacionada ao clima. Assim, este informe analisa a produção científica em inteligência climática entre 2022 e 2025, com base em publicações indexadas na *Web of Science* (WoS), buscando identificar capacidades emergentes, padrões de especialização e oportunidades de cooperação.

1 - Estratégia metodológica

A análise da produção científica foi realizada a partir de registros bibliográficos extraídos da base WoS, selecionada pela sua consistência na indexação e classificação das áreas do conhecimento.

A estratégia de busca[1] foi estruturada em três eixos principais:

1) Aplicação de inteligência artificial e ciência de dados ao estudo do clima.

2) Modelagem e previsão do sistema climático, incluindo meteorologia e modelagem do sistema terrestre.

3) Tecnologias associadas à mitigação climática e à transição energética, com destaque para energias renováveis e modelagem computacional aplicada.

A aplicação dessa estratégia resultou na identificação de 32.040 artigos científicos publicados entre 2022 e 2025.

Bloco Brics

O Brics constitui um espaço estratégico de cooperação multilateral voltado à promoção do desenvolvimento econômico, científico e tecnológico entre países emergentes. Atualmente composto por 11 nações — Brasil, Rússia, Índia, China, África do Sul, Egito, Irã, Indonésia, Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos e Etiópia —, o grupo tem ampliado sua influência no cenário global. Em conjunto, essas economias representam mais de 40% da população mundial e cerca de 41% do produto interno bruto (PIB) global em paridade de poder de compra, segundo estimativas do Fundo Monetário Internacional (FMI), o que consolida o Brics como um dos principais polos de dinamismo econômico e científico do século 21.

1 Um conjunto de vocabulários-chave predefinidos que possuem alto poder de indexação temática especialmente em bases bibliográficas de artigos científicos.

2 - Expansão global da pesquisa em inteligência climática

2.1. Como a produção científica global sobre inteligência climática evoluiu nos últimos anos?

A produção científica associada à inteligência climática tem crescido rapidamente, refletindo a convergência entre avanços na ciência do clima, no processamento de grandes volumes de dados ambientais e na aplicação de técnicas de IA e aprendizado de máquina.

Entre os anos de 2022 e 2025, foram identificados 32.040 artigos científicos relacionados ao tema. Nesse período, o número anual de publicações passou de 5.639 em 2022 (17,6%) para 11.721 em 2025 (36,6%) – isso indica que o volume anual mais que dobrou.

Como mostra o Gráfico 1, a **produção científica global** apresenta forte concentração em poucos países.

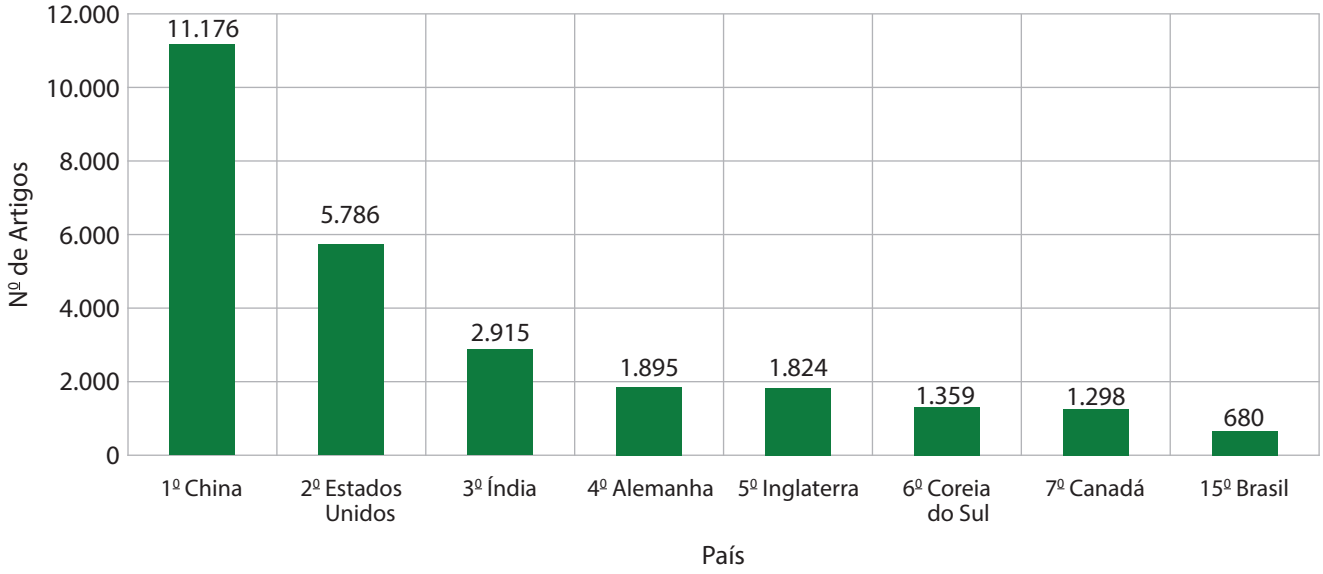


Gráfico 1 - Número de artigos científicos registrados na WoS por país (2022-2025)

Fonte: Elaboração própria do Observatório de Ciência, Tecnologia e Inovação (OCTI), a partir de dados extraídos da Wos (2026).

O gráfico evidencia a liderança da China, com 34,9% das publicações, seguida pelos Estados Unidos (18,1%), Índia (9,1%), Alemanha (5,9%) e Inglaterra (5,7%). O padrão indica que, embora o campo esteja em expansão global, a produção científica permanece concentrada em países com infraestrutura científica robusta, de elevada capacidade computacional e investimentos significativos em pesquisa climática e energética.

Do ponto de vista temático, o campo apresenta forte caráter interdisciplinar. Ciências Ambientais e Ecologia concentram 26,3% dos artigos, seguidas por Engenharia (25,4%), além de áreas como Meteorologia e Ciências Atmosféricas (13%), Geologia (12,2%) e Ciência, Tecnologia e Outros Tópicos (11,5%).

A partir desse panorama global, a análise deste informe volta-se para a atuação dos países do Brics, buscando compreender sua inserção, especialização e relevância na estrutura internacional da pesquisa em inteligência climática.

Estrutura científica da inteligência climática

A produção científica associada à inteligência climática evidencia a consolidação de um campo de pesquisa marcado pela convergência entre ciência do clima, tecnologias digitais e sistemas energéticos. Diferentemente da climatologia tradicional, voltada sobretudo à compreensão de processos atmosféricos, esse campo integra competências científicas e tecnológicas orientadas à análise, à previsão e à gestão de fenômenos climáticos.

A inteligência climática estrutura-se em três grandes eixos de conhecimento:

Ciência do sistema terrestre – reúne pesquisas voltadas à modelagem climática, previsão meteorológica e análise de processos atmosféricos e oceânicos, que constituem a base científica para compreender as dinâmicas do clima e projetar cenários futuros.

Tecnologias analíticas e computacionais – envolve o uso de inteligência artificial, aprendizado de máquina e técnicas avançadas de processamento de dados aplicadas à análise de grandes volumes de informações ambientais provenientes de satélites, sensores e redes de monitoramento.

Tecnologias para mitigação e adaptação climática – inclui pesquisas voltadas à otimização de sistemas energéticos de baixo carbono, à integração de fontes renováveis e ao desenvolvimento de soluções para aumentar a resiliência de sistemas produtivos e urbanos.

A articulação entre esses eixos consolida a inteligência climática como um campo científico aplicado, voltado ao desenvolvimento de instrumentos de apoio à decisão em áreas, como planejamento energético, gestão de recursos hídricos, agricultura e planejamento urbano.

3 - Papel do Brics na produção científica global em inteligência climática

3.1. Qual é a importância do Brics na estrutura internacional da pesquisa em inteligência climática?

Os países do Brics desempenham papel relevante na expansão da pesquisa em inteligência climática. Entre 2022 e 2025, foram identificados 17.460 artigos científicos produzidos por instituições do bloco, correspondendo a 54,5% da produção mundial no campo.

Esse resultado evidencia a importância crescente das economias emergentes na pesquisa climática, especialmente em áreas, como modelagem ambiental, aplicação de inteligência artificial e tecnologias para a transição energética. A evolução temporal acompanha a tendência global: o número anual de publicações passou de 2.830 artigos em 2022 para 6.809 em 2025, mais que dobrando no período.

Apesar desse dinamismo, a produção científica do bloco apresenta forte assimetria interna. A China responde por 64,2% das publicações, consolidando-se como principal polo científico do Brics, seguida pela Índia (16,7%), enquanto os demais países apresentam participação mais limitada.

No âmbito intrabloco, alguns países ganham maior destaque em comparação ao quadro geral. Arábia Saudita e Irã figuram entre os principais produtores, enquanto o Brasil melhora sua posição, passando do 15º lugar no *ranking* global para o 7º entre os membros do Brics e dos seus coautores.

A distribuição temática da produção científica do bloco é semelhante à observada globalmente. Como mostra o Gráfico 2, predominam Engenharia (27,7%) e Ciências Ambientais e Ecologia (27,4%), seguidas por Geologia (12,8%), Ciência, Tecnologia e Outros Tópicos (12,1%), Sensoriamento Remoto (11,6%) e Meteorologia e Ciências Atmosféricas (11,5%).

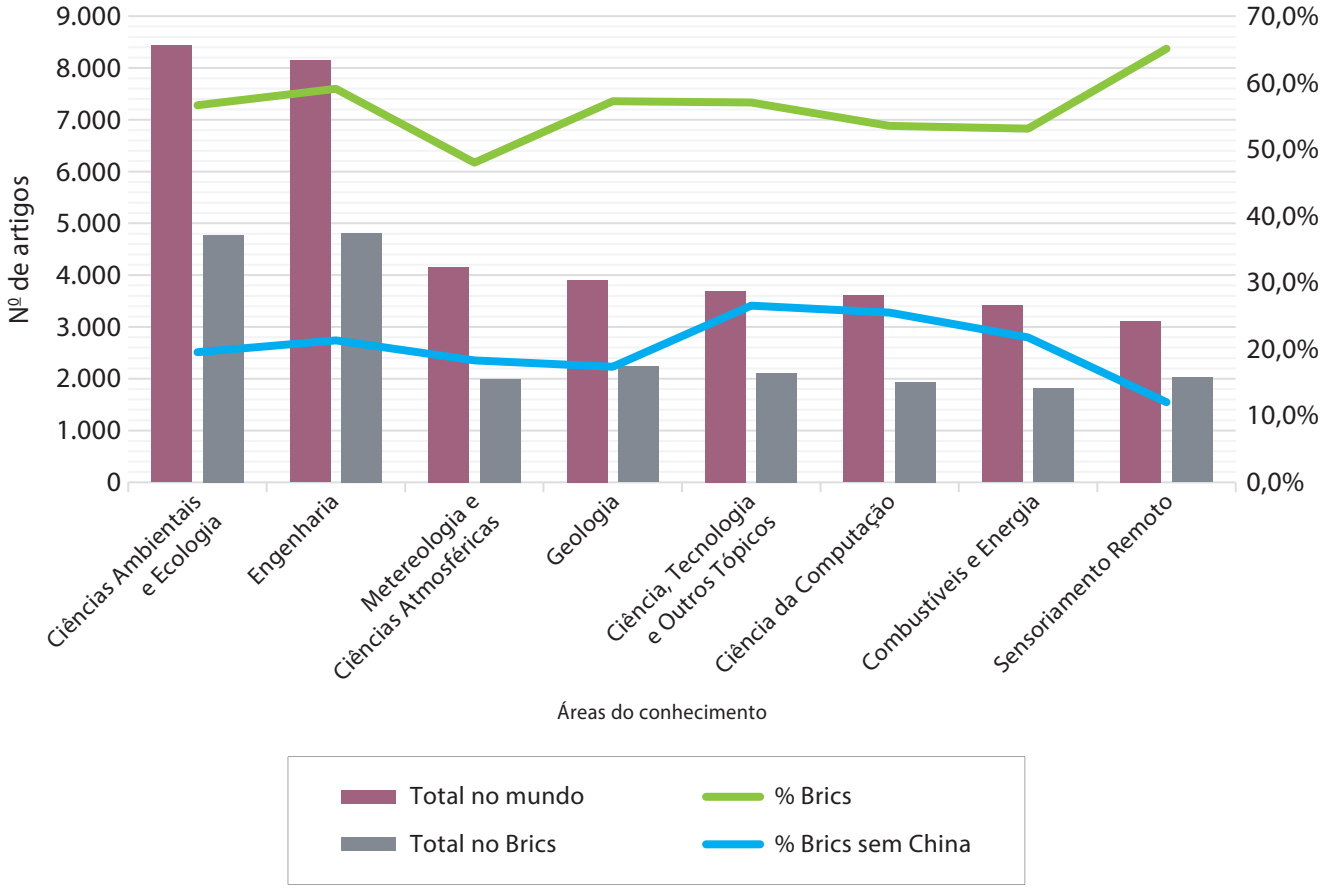


Gráfico 2 - Número de artigos científicos registrados na WoS por áreas de conhecimento (2022-2025)

Fonte: Elaboração própria do OCTI, a partir de dados extraídos da Wos (2026).

Os dados indicam, contudo, forte dependência da produção chinesa. Sem a China, a participação do Brics na produção global cai significativamente em diversas áreas – por exemplo: em Engenharia, de 59,1% para 21,3%; em Ciências Ambientais e Ecologia, de 56,6% para 19,5%; em Meteorologia e Ciências Atmosféricas, de 48% para 18,3%; e em Geologia, de 57,2% para 17,4%.

Esse padrão indica que, embora o Brics tenha participação relevante no campo da inteligência climática, suas capacidades científicas permanecem concentradas em poucos países, o que reforça a importância de ampliar a cooperação científica e fortalecer as capacidades de pesquisa entre os demais membros do bloco[2].

A seção seguinte examina como essas competências se organizam em produção temática, permitindo identificar seus principais padrões de especialização.

2 Embora a produção científica, medida pelo volume de artigos publicados, não esgote todas as dimensões da capacidade científica, que também envolve infraestrutura de pesquisa, formação de recursos humanos e redes de colaboração, ela constitui indicador amplamente utilizado para avaliar a presença e a dinâmica de países em determinados campos do conhecimento.

4 - Competências científicas e especializações temáticas no Brics

4.1. Em que temas e aplicações os países do Brics estão produzindo conhecimento?

A produção científica em inteligência climática revela perfis distintos de especialização entre os países do Brics, o que reflete as características de seus sistemas científicos, suas matrizes energéticas e seus desafios ambientais. O Quadro 1 sintetiza essas competências.

Quadro 1 - Principais competências científicas em inteligência climática nos países do Brics

País	Principais competências
China	Modelos preditivos de geração de energia solar e eólica, integração de renováveis, otimização urbana, observação da Terra e monitoramento de eventos extremos com IA.
Índia	Energia renovável, gestão de recursos hídricos, agricultura sustentável e previsão meteorológica aplicada à geração energética.
Brasil	Otimização da produção de energia renovável, modelagem climática com aprendizado de máquina, estudos amazônicos e agricultura resiliente.
Rússia	Modelagem climática, previsão meteorológica com IA e monitoramento ambiental.
Arábia Saudita/Irã	Monitoramento climático, gestão de riscos ambientais, *microgrids* e integração de hidrogênio verde (H_2V).
Egito	Previsão de secas, gestão de recursos hídricos e otimização de sistemas energéticos renováveis.
África do Sul	Previsão ambiental com IA, agricultura inteligente, monitoramento de solos e biodiversidade.
Emirados Árabes Unidos	Eficiência energética urbana, gestão hídrica e monitoramento ambiental.
Indonésia/Etiópia	Energia renovável, agricultura adaptativa e gestão de riscos climáticos.

Fonte: Elaboração própria do OCTI, a partir de dados extraídos da Wos (2026).

De forma geral, observa-se forte presença de pesquisas relacionadas à transição energética, ao monitoramento ambiental e à gestão de recursos naturais e à adaptação climática.

Entre 2022 e 2024, os países do bloco registraram expansão nessas temáticas, em linha com tendências já identificadas na 5ª edição do *Boletim Anual do Observatório de Ciência, Tecnologia e Inovação* (CGEE, 2025). China e Índia concentram as maiores capacidades científicas, tanto em volume quanto em diversidade temática, enquanto os demais países apresentam especializações mais focadas, frequentemente associadas a contextos ambientais e produtivos específicos.

Em particular, observa-se forte presença de pesquisas relacionadas à transição energética, ao monitoramento ambiental e à gestão de recursos naturais, o que indica que a inteligência climática tem sido mobilizada como instrumento científico para enfrentar desafios concretos de adaptação e mitigação climática.

Como destacado no *Boletim Anual do OCTI 2024* (CGEE, 2025), a consolidação dessas competências científicas e tecnológicas tende a desempenhar papel relevante no desenvolvimento de soluções voltadas ao enfrentamento das mudanças climáticas e na ampliação das oportunidades de cooperação científica entre os países do Brics.

A partir dessas especializações, torna-se relevante examinar como essas competências se articulam na produção científica do bloco. A seção seguinte analisa a estrutura das redes de pesquisa em inteligência climática, permitindo identificar a formação de seus *clusters* centrais e potenciais espaços de colaboração intrabloco.

5 - Estrutura da rede de produção científica Brics

5.1. Como a produção científica do Brics se organiza em redes e agrupamentos temáticos?

A análise de redes semânticas permite identificar padrões de organização do conhecimento e potenciais de colaboração científica em campos complexos. O método estabelece vínculos entre artigos a partir da similaridade de títulos e resumos, o que possibilita mapear agendas convergentes, agrupamentos temáticos e complementaridades entre países e instituições.

O Quadro 2 apresenta a base empírica da análise.

Quadro 2 - Base empírica da análise de rede

Indicador	Valor
Período analisado	2024-2025, para dar foco ao período mais recente
Artigos analisados	11.207
Base de dados	*Web of Science*
Critério de seleção	Pelo menos um autor afiliado à instituição de país do Brics[3]

Fonte: Elaboração própria do OCTI, a partir de dados extraídos da Wos (2026).

Os resultados indicam forte centralidade da China na estrutura da rede, presente em 66% dos artigos analisados (7.385 publicações) e com papel estruturante nas agendas de pesquisa. Em conjunto com a Índia, os dois países concentram cerca de 80% da produção científica nesse período, o que evidencia elevada concentração de capacidades no bloco.

Entre as instituições mais recorrentes na produção científica chinesa, destacam-se a Universidade Zhejiang, a Universidade de Wuhan, a Universidade Tsinghua, a Universidade Tongji, a Universidade Sun Yat-sen, a Universidade Nacional de Tecnologia de Defesa e a Universidade Hohai.

Na Índia, aparecem com frequência o Instituto de Tecnologia Vellore, diferentes unidades dos institutos indianos de tecnologia (IIT), como o IIT Kharagpur, além do Instituto Nacional de Tecnologia de Delhi e da Universidade de Roorkee.

A Figura 1 apresenta a nuvem geral de palavras-chave usadas pelos autores nos artigos analisados. Para melhorar a visualização, foram removidos termos dominantes como *machine learning* e *deep learning*, que concentram grande parte das ocorrências. Ainda assim, a nuvem evidencia os principais objetos empíricos e as aplicações que estruturam o campo.

3 A rede gerada com esse universo de publicações não exclui a participação de autores de outros países nas mesmas publicações, uma vez que incorpora colaborações com instituições externas ao bloco, como Estados Unidos e Alemanha.

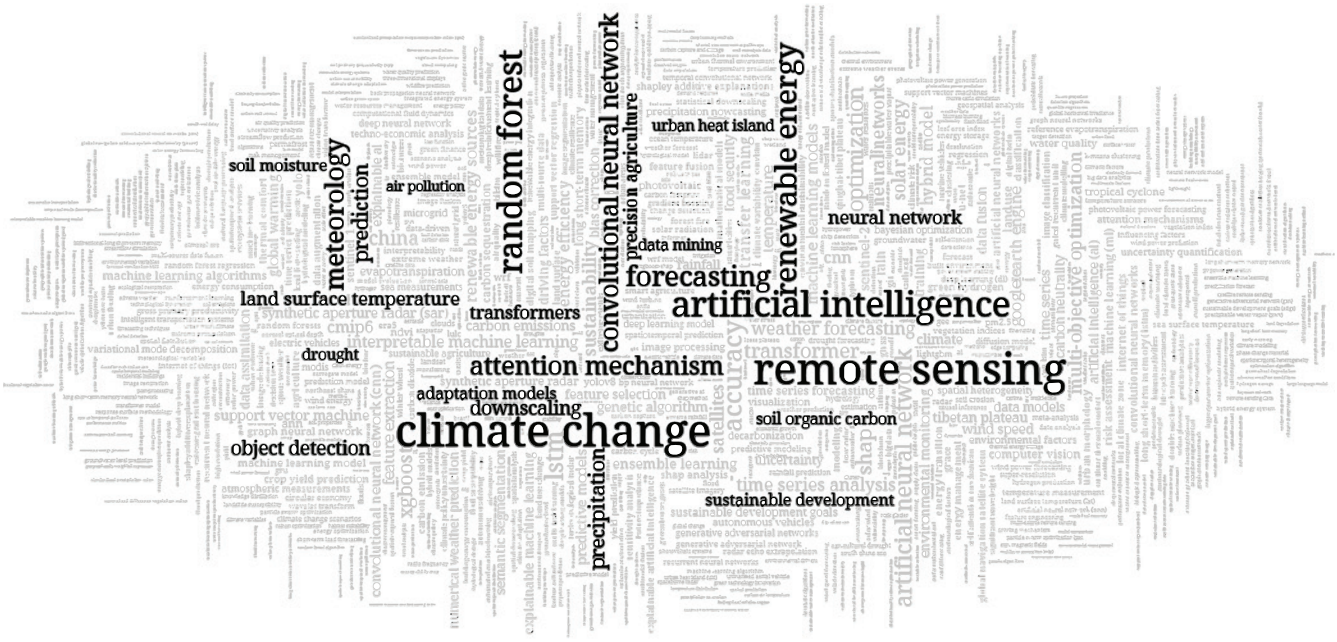


Figura 1 - Nuvem de palavras-chave de artigos científicos em inteligência climática com autores do Brics (WoS, 2024-2025)

Fonte: Elaboração própria do OCTI, a partir de dados extraídos da Wos (2026).

No campo da inteligência climática, sobressaem estudos voltados à agricultura de precisão, à modelagem preditiva para gestão ambiental, ao planejamento energético com base em fontes renováveis e monitoramento de eventos climáticos extremos. Também são frequentes estudos sobre modelos adaptativos e técnicas de *forecasting*, o que evidencia a centralidade da previsão climática, além de temas, como ilhas de calor urbano, secas, poluição do ar e gestão de recursos naturais, frequentemente associados a sensoriamento remoto, detecção de objetos e *downscaling* climático.

Em conjunto, esses elementos indicam que a inteligência climática se configura como campo científico aplicado, com base na integração entre modelagem avançada, dados ambientais e sistemas de apoio à decisão voltados à adaptação e à mitigação climática.

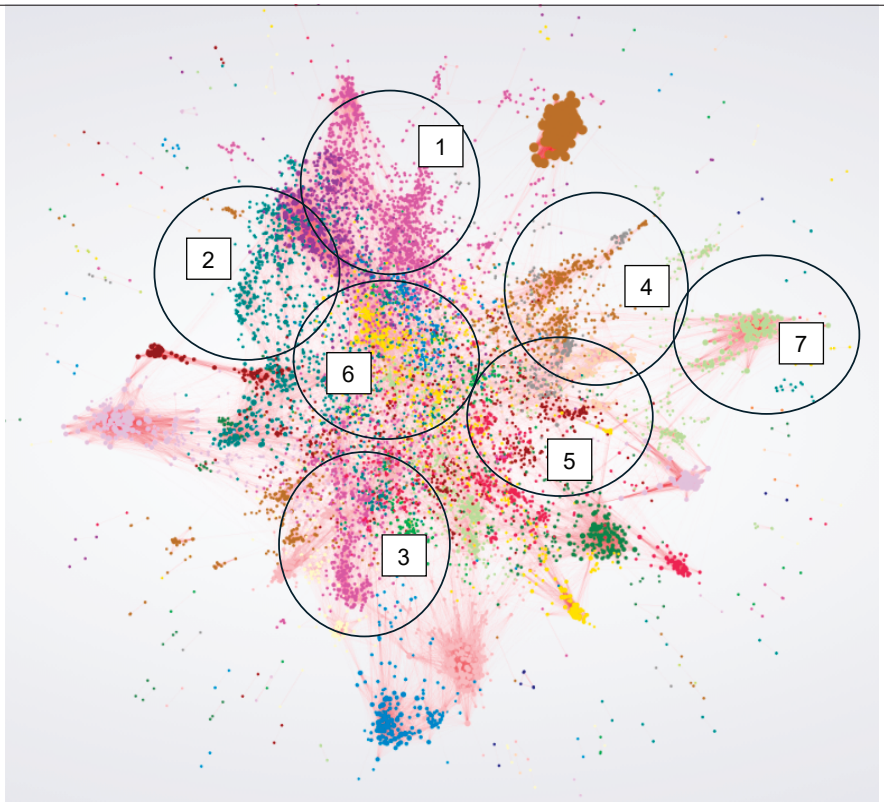
A seção seguinte analisa os principais agrupamentos temáticos identificados na rede, o que permite compreender como essas agendas se estruturam na produção científica do Brics.

6 - Análise dos agrupamentos temáticos

6.1. Como se estruturam os principais agrupamentos temáticos da produção científica em inteligência climática no Brics?

A Figura 2 apresenta a rede semântica da produção científica em inteligência climática associada aos países do Brics. Cada ponto representa um artigo científico, já as conexões indicam proximidade temática com base na similaridade de títulos e resumos.

As cores representam agrupamentos temáticos (*clusters*), ou seja, conjuntos de artigos que compartilham agendas de pesquisa semelhantes. A proximidade entre os pontos indica maior afinidade temática, enquanto regiões mais densas revelam áreas intensas de investigação.



Legenda dos principais *clusters*:

Roxo claro (1): IA aplicada à otimização energética e à resiliência urbana, com foco em desempenho e consumo energético.

Verde escuro (2): Inteligência climática com foco em transição energética, com uso intenso de modelagem e ferramentas de IA.

Rosa (3): Agricultura inteligente e gestão de recursos, como cultivo de precisão, IA e *big data*.

Marrom (4): IA integrada a variáveis climáticas para modelagem e otimização de sistemas complexos.

Vinho (5): Previsão de precipitação, temperatura e eventos extremos, com uso de dados de radar e satélite.

Amarelo (6): Previsão de vento e aplicações em energia renovável, com foco em energia eólica.

Verde Claro (7): Monitoramento e previsão de incêndios florestais com sensoriamento remoto.

Figura 2 - Rede de artigos científicos em inteligência climática com autores do Brics (WoS, 2024-2025)

Fonte: Elaboração própria do OCTI, a partir de dados extraídos da Wos (2026).

A partir dessa estrutura, é possível identificar que os dez maiores *clusters* – definidos pela forte convergência semântica entre títulos e resumos – concentram 5.423 dos 11.270 artigos publicados entre 2024 e 2025.

Esses agrupamentos reúnem diferentes competências científicas associadas à inteligência climática e evidenciam o peso da produção chinesa na organização temática do campo. Entre os artigos presentes nesses *clusters*, 2.474 foram produzidos exclusivamente por instituições da China, sem coautoria internacional, o que indica elevada capacidade científica doméstica e concentração da produção em áreas estratégicas.

Para fins analíticos, este informe foca nos três maiores agrupamentos temáticos, que concentram as agendas de pesquisa mais estruturadas no campo. A Tabela 1 apresenta as taxas de cooperação científica intrabloco[4] para cada um desses agrupamentos.

4 A colaboração é efetiva quando um artigo científico apresenta diferentes pesquisadores vinculados a dois ou mais países do bloco Brics, por meio das suas instituições indexadas na WoS.

Tabela 1 - Taxa de cooperação efetiva entre autores do Brics por agrupamento temático da rede de artigos do bloco (WoS, 2024-2025)

País	% colaboração com bloco (*cluster* 1)	% colaboração com bloco (*cluster* 2)	% colaboração com bloco (*cluster* 3)
Brasil	4.8	5.3	10.4
Rússia	57.1	33.3	28.6
Índia	25.5	24.6	18.7
China	4.8	9.6	9.7
África do Sul	18.8	29.2	41.7
Irã	13.2	16.9	12.5
Arábia Saudita	57.1	49.0	63.2
Egito	48.1	52.5	56.8
Etiópia	50.0	60.0	66.7
Emirados Árabes	0.0	0.0	0.0
Indonésia	18.2	9.1	15.4

Fonte: Elaboração própria do OCTI, a partir de dados extraídos da Wos (2026).

Nos três principais *clusters*, os padrões de colaboração científica no Brics revelam dinâmicas distintas de inserção internacional. Países como Arábia Saudita e Etiópia apresentam elevadas taxas de colaboração intrabloco, possivelmente associadas à maior dependência de parcerias e infraestrutura científica externa. Rússia e África do Sul ocupam posições intermediárias, com níveis relevantes de cooperação, ainda que variáveis entre os *clusters*. Já China e Brasil apresentam baixas taxas intrabloco, o que demonstra menor integração relativa no arranjo científico do Brics.

Em conjunto, os dados mostram que a colaboração em inteligência climática no bloco é heterogênea, o que reflete tanto assimetrias de capacidade científica quanto diferentes estratégias de internacionalização da pesquisa.

Na sequência, são analisados os três principais *clusters* identificados.

Cluster 1 – Inteligência climática aplicada ao clima urbano, energia e cidades

O primeiro *cluster* corresponde ao maior agrupamento temático da rede e reúne pesquisas voltadas à análise das interações entre clima urbano, sistemas energéticos e processos de urbanização (Figura 3). Os estudos articulam três competências principais: modelagem do microclima urbano, análise do desempenho energético de edificações e aplicação de técnicas de inteligência artificial a dados ambientais e geoespaciais.

deep learning
land surface temperature
climate change
remote sensing
thermal environment
land surface temperature (lst)
thermal comfort
random forest
optimization
multi-objective optimization
urban heat island
interpretable machine learning
local climate zone
local climate zones
artificial neural networks
renewable energy
sustainable development
energy efficiency
artificial intelligence
explainable machine learning
residential buildings
phase change material
urban green space
building energy consumption
built environment
urban planning
convolutional neural network
urban microclimate
building envelope
carbon emissions
energy consumption
surface urban heat island
forecasting
support vector machine
universal thermal climate index
land use and land cover
urban morphology
solar energy
artificial neural network
outdoor thermal comfort
shap analysis
shapley additive explanations
urban heat island effect
sustainability
downscaling
google earth engine
long short-term memory
carbon sequestration
ecosystem services
bayesian optimization
natural ventilation
building performance simulation
sensitivity analysis
phase change material
urbanization
climate resilience
data-driven
transfer learning
time series
urban thermal environment
convolutional neural network (cnn)
circular economy
carbon emissions
support vector machine
urban heat island (uhi)
urban planning
building energy consumption
built environment
solar radiation
solar energy utilization
universal thermal climate index
local climate zone (lcz)
machine learning models
artificial intelligence
energy efficiency
sustainable development
renewable energy
urban green space
urban microclimate
building envelope
carbon emissions
energy consumption
surface urban heat island
forecasting
support vector machine
universal thermal climate index (utci)

Cluster 2 – Inteligência artificial, otimização energética e governança para transição energética

O segundo *cluster* (Figura 4) reúne pesquisas voltadas à aplicação de inteligência artificial e modelagem avançada no desenvolvimento de sistemas energéticos de baixo carbono. Os estudos abordam a integração de fontes renováveis (solar, eólica, biomassa e hidrogênio), sistemas híbridos, *microgrids* e tecnologias de armazenamento.

Grande parte da produção utiliza modelos preditivos e técnicas de otimização para lidar com incertezas climáticas, variações de demanda e flutuações na geração energética, incluindo também temas, como governança energética, riscos climáticos, finanças verdes e estratégias de transição para economias de baixo carbono.

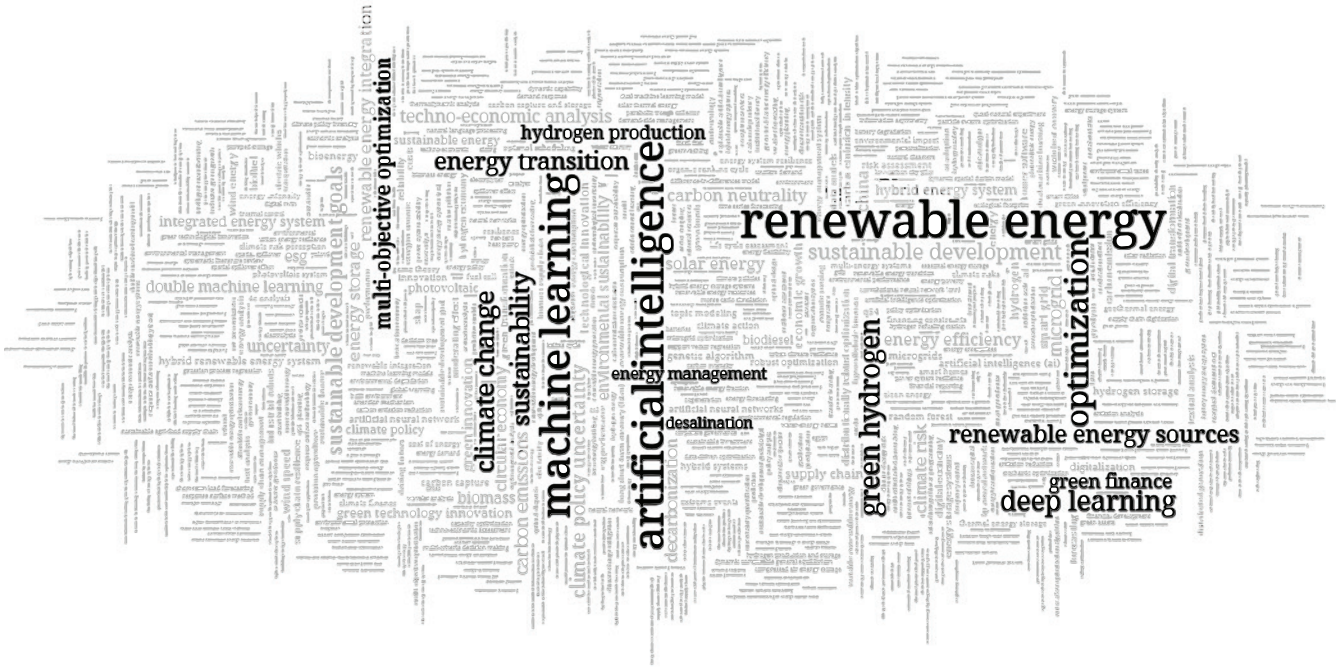


Figura 4 - *Cluster* 2 – Inteligência artificial, otimização energética e governança para transição energética: nuvem de palavras-chave de artigos com autores do Brics (WoS, 2024-2025)

Fonte: Elaboração própria do OCTI, a partir de dados extraídos da Wos (2026).

A China responde por cerca de 56% das publicações, com forte atuação em modelagem e otimização de sistemas energéticos complexos, integração de renováveis e desenvolvimento de tecnologias associadas ao hidrogênio e à bioenergia. Ainda, destaca-se na aplicação de aprendizado de máquina para previsão de geração, operação de *microgrids* e análise de eficiência energética.

A Índia, com 16,5% da produção, concentra pesquisas em planejamento energético, integração de renováveis e modelagem voltada à resiliência urbana. Já países como Arábia Saudita, Irã e Egito também apresentam presença relevante, especialmente em *microgrids*, hidrogênio verde e gestão energética em contextos industriais e urbanos.

O Brasil (2,5%) atua principalmente na integração de energias renováveis,

bioenergia e modelagem de sistemas elétricos distribuídos, com destaque para biomassa, biocombustíveis e aplicações de aprendizado de máquina na previsão e na sustentabilidade energética.

Esse *cluster* revela uma divisão funcional de competências: a China lidera em modelagem e desenvolvimento tecnológico em larga escala; Índia e Arábia Saudita destacam-se em planejamento energético e adaptação de tecnologias; e outros países contribuem com aplicações específicas e contextuais.

No caso da Índia, a produção científica destaca-se pela integração entre energias renováveis, biomassa, hidrogênio verde e *microgrids* inteligentes, com forte utilização de modelagem preditiva e análise de cenários voltadas ao planejamento energético e à resiliência urbana. Já a Arábia Saudita diferencia-se pela aplicação intensiva de aprendizado de máquina e *deep learning* na previsão de geração energética, na otimização de sistemas híbridos e na gestão de infraestruturas energéticas complexas, incorporando também análises relacionadas à governança energética, às finanças verdes e às estratégias industriais de transição para economias de baixo carbono.

Essa complementaridade sugere a formação de um eixo científico-tecnológico no qual diferentes países podem contribuir com competências específicas: desenvolvimento tecnológico e modelagem avançada, planejamento energético e integração regional de renováveis, além de aplicações industriais e financeiras associadas à transição energética.

A convergência dessas agendas cria oportunidades para projetos colaborativos capazes de combinar modelagem avançada, análise de cenários e implementação tecnológica em diferentes contextos socioeconômicos. Nesse cenário, o Brasil apresenta competências relevantes em bioenergia, integração de energias renováveis e sistemas energéticos distribuídos, o que o posiciona como ator potencialmente estratégico em agendas relacionadas à bioenergia, às redes energéticas inteligentes e à integração entre sistemas agrícolas e energéticos.

A interação entre Brasil e China, em particular, apresenta potencial significativo de cooperação científica e tecnológica. Enquanto a China reúne experiência consolidada em modelagem energética de alta resolução, otimização de sistemas urbanos e desenvolvimento tecnológico em larga escala, o Brasil contribui com *expertise* em bioenergia, integração de renováveis e gestão de sistemas energéticos distribuídos.

A articulação dessas competências pode favorecer o desenvolvimento de soluções híbridas de energia e estratégias integradas de mitigação climática, o que combina infraestrutura energética avançada, sistemas bioenergéticos e tecnologias digitais de monitoramento e otimização. Esse tipo de cooperação científica e tecnológica pode contribuir para acelerar a transição energética e ampliar o desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono no âmbito do Brics.

Em síntese, o *cluster* indica que a aplicação de inteligência artificial à gestão de sistemas energéticos está se consolidando como importante vetor científico e tecnológico da transição climática global, com os países do Brics desempenhando papel crescente na estruturação dessas agendas de pesquisa.

Cluster 3 – Agricultura inteligente, gestão de recursos e resiliência climática

O terceiro *cluster* reúne pesquisas voltadas à aplicação de inteligência artificial, aprendizado de máquina e sensoriamento remoto na agricultura e na gestão de recursos naturais (Figura 5). Os estudos abordam temas, como previsão de produtividade agrícola, monitoramento de estresse hídrico e térmico, gestão da irrigação e adaptação de sistemas produtivos às mudanças climáticas.

Figura 5 - *Cluster* 3 - Agricultura inteligente, gestão de recursos e resiliência climática: nuvem de palavras-chave de artigos com autores do Brics (WoS, 2024–2025)

Fonte: Elaboração própria do OCTI, a partir de dados extraídos da Wos (2026).

Adicionalmente, observa-se o desenvolvimento de sistemas de agricultura de precisão, *frameworks* de IA explicáveis e integrações com *big data* e *blockchain*, voltados para adaptação a cenários climáticos futuros, planejamento estratégico de cultivos e suporte à tomada de decisão orientada pelo clima.

A produção utiliza dados de satélites, sensores remotos e registros climáticos para desenvolver modelos capazes de antecipar riscos, orientar o manejo e aumentar a eficiência produtiva.

A China concentra 52% das publicações, sobressaindo em monitoramento agrícola em larga escala, modelagem de produtividade e agricultura de precisão, com uso integrado de sensoriamento remoto, aprendizado profundo e grandes bases de dados. Também apresenta protagonismo na aplicação de IA à gestão de recursos naturais, com modelos capazes de avaliar impactos de eventos extremos e apoiar estratégias de adaptação.

A Índia responde por cerca de 26% da produção, com foco em aplicações práticas de IA para monitoramento e decisão agrícola, incluindo plataformas digitais, previsão de safras e sistemas de recomendação, especialmente em contextos regionais e de pequenos produtores.

Embora compartilhe com a China o uso intensivo de inteligência artificial e sensoriamento remoto, a produção científica indiana tende a priorizar aplicações operacionais e ferramentas digitais voltadas à gestão agrícola e ao planejamento produtivo em escala regional no conjunto analisado.

O Brasil apresenta participação de 6,7%, com destaque em modelagem agroclimática, monitoramento ambiental e agricultura de precisão, especialmente em sistemas tropicais. As pesquisas incluem previsão de produtividade (como soja, milho e cana), monitoramento de estresse hídrico e uso de IA para manejo e gestão de recursos, além de estudos sobre o uso da terra e dinâmica de biomas, como Amazônia e Cerrado.

O Egito, com 6% das publicações, destaca-se em gestão hídrica e agricultura irrigada em regiões áridas, com foco em evapotranspiração, uso eficiente da água e monitoramento agrícola com IA.

De forma geral, o *cluster* revela forte convergência entre inteligência artificial, monitoramento ambiental e sistemas agrícolas, com uma divisão complementar de competências: China e Índia lideram em modelagem e sistemas digitais, enquanto Brasil e Egito especializam-se em agricultura tropical ou em regiões áridas e semiáridas, gestão de recursos e adaptação a condições climáticas específicas.

Essa diversidade de competências sugere oportunidades relevantes de cooperação científica e tecnológica voltadas ao desenvolvimento de sistemas agrícolas mais resilientes às mudanças climáticas. Em particular, a integração entre modelagem climática, monitoramento ambiental e tecnologias digitais aplicadas à agricultura pode contribuir para fortalecer estratégias de segurança alimentar e sustentabilidade produtiva em regiões tropicais e semiáridas.

Assim, esse *cluster* mostra que a aplicação de inteligência artificial à agricultura e à gestão de recursos naturais está se consolidando como eixo estratégico da pesquisa climática global, com os países do Brics desempenhando papel crescente no desenvolvimento de soluções tecnológicas voltadas à adaptação climática e à sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Considerações finais

A análise da produção científica em inteligência climática evidencia a expansão de um campo científico-tecnológico central para o enfrentamento das mudanças climáticas, estruturado pela convergência entre ciência do clima e de dados, inteligência artificial, modelagem ambiental e sistemas energéticos e produtivos. O crescimento acelerado das publicações, nos últimos anos, reflete não apenas o avanço do conhecimento, mas também a crescente centralidade desse campo como potencial para formulação de políticas públicas, planejamento territorial e tomada de decisão em contextos de incerteza climática.

Nesse cenário, os países do Brics assumem papel de destaque na estrutura internacional da pesquisa, respondendo por mais da metade da produção científica global no período analisado. Esse protagonismo, no entanto, é marcado por forte assimetria interna: a China concentra parcela significativa das capacidades científicas e ocupa posição central na rede temática de produção, enquanto a Índia consolida-se como segundo polo relevante. Os demais países participam de forma mais seletiva, frequentemente associados a agendas específicas relacionadas a seus contextos ambientais, energéticos e produtivos.

A análise das redes e dos agrupamentos temáticos revela que a produção científica do bloco se organiza em torno de três grandes eixos estruturantes: cidades e energia, transição energética e agricultura inteligente. Esses eixos expressam uma divisão funcional e complementar de competências entre os países, combinando capacidades em modelagem avançada, desenvolvimento tecnológico e aplicações territoriais. Essa complementaridade constitui ativo estratégico do Brics, ao indicar a possibilidade de construção de agendas científicas integradas e voltadas a desafios climáticos globais.

Apesar desse potencial, os padrões de colaboração identificados indicam que a produção científica ainda se estrutura predominantemente em circuitos nacionais ou binacionais, com níveis limitados de cooperação intrabloco. Essa configuração sugere que o Brics, embora relevante como polo agregado de produção científica, ainda não se configura plenamente como sistema articulado de geração de conhecimento em inteligência climática.

O fortalecimento dessa articulação representa oportunidade estratégica. A integração de bases de dados ambientais, o desenvolvimento conjunto de ferramentas de inteligência artificial aplicadas ao clima e a implementação de projetos colaborativos em diferentes contextos territoriais – urbanos, energéticos e agrícolas – podem ampliar a capacidade do bloco de produzir soluções escaláveis e adaptadas a diferentes realidades climáticas.

Nesse contexto, países como o Brasil assumem papel potencialmente estratégico, ao aportar competências diferenciadas em agricultura tropical, bioenergia e integração entre sistemas ambientais e produtivos, complementando, por exemplo, as capacidades de modelagem e infraestrutura científica de países como China e Índia.

Em síntese, ao combinar escala científica, diversidade de competências e relevância geopolítica, o Brics reúne condições para se projetar como um dos principais polos globais de inovação em inteligência climática. A realização desse potencial, contudo, depende do avanço na articulação efetiva de suas redes de cooperação científica e tecnológica, transformando complementaridade em integração e capacidade científica em soluções compartilhadas para os desafios climáticos do século 21.

Referências

BHATTACHARJEE, S.; HAQUE, R.; DE BUY WENNIGER, G.M.; WAY, A. Investigating query expansion and coreference resolution in question answering on BERT. *In:* METAIS, E.; MEZIANE, F.; HORACEK, H.; CIMIANO, P. (Eds.). Natural language processing and information systems. NLDB 2020. v. 12089 of Lecture Notes in Computer Science. **Anais…** Springer, p. 47-59, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-51310-8_5.pdf?pdf=inline%20link

BOOT, Peter. Distant reading. Franco Moretti. **Digital Scholarship in the Humanities,** v. 30, Is. 1, Apr 2015, Pages 152-154. Disponível em: https://academic.oup.com/dsh/article-abstract/30/1/152/354026?login=false

BORNMANN, Lutz; LEYDESDORFF, Loet. Skewness of citation impact data and covariates of citation distributions: A large scale empirical analysis based on *Web of Science* data. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 1, 2017, p. 164-175. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1751157716303108

BRICS Brasil 2025. **Sobre o BRICS.** 2025. Disponível em: https://brics.br/pt-br/sobre-o-brics

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. **Boletim anual OCTI – 2024**, v. 5, dez. 2025. Brasília: 110 p. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/37878/157581/000169+-+CGEE+Boletim+Anual+OCTI+2024+V2+10+-+07-01-2026.pdf/6a1bd537-b284-9862-d9a2-6a44c78a924f?version=1.0&t=1767896687530

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. **CGEE realiza encontros internacionais sobre foresight no âmbito da presidência brasileira do Brics**. 28 out. 2025. Disponível em: https://www.cgee.org.br/web/cgee/w/cgee-realiza-encontros-internacionais-sobre-foresight-no-%C3%A2mbito-da-presid%C3%AAncia-brasileira-do-brics

COBO, M.J.; LÓPEZ-HERRERA, A.G.; HERRERA-VIEDMA, E.; HERRERA, F. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the fuzzy sets theory field. **Journal of Informetrics**, v. 5, n. 1, p. 146-166, 2011. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1751157710000891

PACKER, Abel. SciELO Citation Index no Web of Science. **SciELO em Perspectiva.** 2014. Disponível em: https://blog.scielo.org/blog/2014/02/28/scielo-citation-index-no-web-of science/#.X5d_5IhKhPY

Lista de siglas e abreviaturas encontradas nesta publicação

Brics | agrupamento formado por 11 países-membros: Brasil, Rússia, Índia, China, África do Sul, Egito, Irã, Indonésia, Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos e Etiópia

CGEE | Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

H_2V | Hidrogênio verde

IA | Inteligência artificial, acrônimo em Inglês para: artificial intelligence

IIT | Institutos indianos de tecnologia

OCTI | Observatório de Ciência, Tecnologia e Inovação

Nota Metodológica

As expressões de busca utilizadas para o mapeamento da produção científica em inteligência climática foram elaboradas a partir de um processo estruturado e participativo, com base em atividades de *foresight* realizadas no âmbito do *Workshop Internacional em Foresight* e do Seminário Internacional em *Foresight,* ocorridos em outubro de 2025, na sede do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE (CGEE, 2025).

Esses eventos reuniram representantes de delegações diplomáticas oficiais do Brasil, da China, do Irã e da Rússia, além de parceiros nacionais e internacionais, com o objetivo de antecipar tendências, identificar desafios emergentes e promover a construção compartilhada de agendas estratégicas em inteligência do clima. As atividades de *foresight* incluíram dinâmicas colaborativas de discussão e validação de conceitos, nas quais foram levantados e refinados os principais termos e as combinações relevantes para a temática.

A definição das expressões de busca resultou, portanto, de um processo coletivo, ancorado em múltiplas perspectivas institucionais e geográficas e alinhado às iniciativas de fortalecimento da agenda de *foresight* no contexto do Brics, durante a presidência brasileira.

Destaca-se que o monitoramento da produção científica em inteligência climática integra um processo contínuo de análise conduzido pelo Observatório de Ciência, Tecnologia e Inovação (OCTI). Nesse contexto, edições futuras incorporarão estudos mais aprofundados, acompanhando a evolução conceitual e tecnológica do campo.

Informe OCTI – Ano 7, nº 8 – abril de 2026

Diretor-presidente
Anderson Stevens Leonidas Gomes

Diretor de projetos estratégicos e relações internacionais
Caetano Christophe Rosado Penna

Diretora de projetos estratégicos e relações institucionais
Concepta Mcmanus

Diretor de administração e finanças
Geraldo Nunes Sobrinho

Coordenadora
Adriana Badaró de Carvalho

Equipe técnica do CGEE
Elisa Nunes de Freitas (estagiária)
Fábio Augusto Melo Assunção
Gabriel Vinicius França Figueiredo
Lília Rodrigues Fernandes
Marcelo Augusto de Paiva dos Santos
Maria Izabel Araújo de Melo Neta
Pedro Borges Alves (estagiário)

Edição
Danúzia Queiroz/Contexto Gráfico

Diagramação e capa
Contexto Gráfico

Projeto gráfico
Núcleo de Design Gráfico do CGEE

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, SCS Qd. 9, Bl. C, 4º andar, Ed. Parque Cidade Corporate, 70308-200, Brasília/DF, Telefone: (61) 3424.9600

@CGEE_oficial | *www.cgee.org.br* | *@CGEE* | *@CGEE_oficial* | *@Centro de Gestão e Estudos Estratégicos*