UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Sorocaba

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em
Ciências Ambientais

GIDEÃO GABRIEL GONÇALVES

REVISÃO SISTEMÁTICA E ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA SOBRE A SORÇÃO DE ÁGUA ATMOSFÉRICA COM ESPACIALIZAÇÃO NA REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA

Sorocaba
2025

GIDEÃO GABRIEL GONÇALVES

REVISÃO SISTEMÁTICA E ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA SOBRE A SORÇÃO DE ÁGUA ATMOSFÉRICA COM ESPACIALIZAÇÃO NA REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Orientadora: Profª. Dra. Valquíria de Campos

Sorocaba

2025

G635r

Gonçalves, Gideão Gabriel
Revisão sistemática e análise bibliométrica sobre a sorção de água atmosférica com espacialização na região semiárida brasileira / Gideão Gabriel Gonçalves. -- Sorocaba, 2025
101 f. : tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientadora: Valquiria de Campos

1. Recursos naturais. 2. Climatologia. 3. Geociências. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Revisão sistemática e análise bibliométrica sobre a sorção de água atmosférica com espacialização na região semiárida brasileira

AUTOR: GIDEÃO GABRIEL GONÇALVES
ORIENTADORA: VALQUIRIA DE CAMPOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br
VALQUIRIA DE CAMPOS
Data: 09/12/2025 16:27:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª. Drª. VALQUIRIA DE CAMPOS (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS

Documento assinado digitalmente
gov.br
CARLA AMERICO
Data: 09/12/2025 15:44:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª. Drª. CARLA AMÉRICO (Participaçao Virtual)
Unesp Instituto de Ciencia e Tecnologia de Sorocaba

Documento assinado digitalmente
gov.br
MARIA GABRIELA DE QUEIROZ
Data: 09/12/2025 15:25:48-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª. Drª. MARIA GABRIELA QUEIROZ (Participaçao Virtual)
Universidade do Estado de Minas Gerais

Sorocaba, 09 de dezembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista (UNESP), ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais pela oportunidade e pela estrutura que tornaram possível a realização deste mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), manifesto minha sincera gratidão pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para minha permanência no programa e para o desenvolvimento desta pesquisa.

Expresso um agradecimento especial à minha orientadora, Profª Assoc. Valquiria de Campos, pela orientação atenta, pela confiança e pelo acolhimento. Sua generosidade ao me integrar em sua trajetória acadêmica e em seu grupo de pesquisa proporcionou uma formação que ultrapassa o domínio científico, abrangendo também valores humanos e profissionais que levarei adiante.

Agradeço aos colegas da pós-graduação pelo companheirismo, pela amizade e pelas trocas constantes que tornaram mais leve e produtiva a caminhada do mestrado. As discussões, o apoio mútuo e os feedbacks foram essenciais para o amadurecimento pessoal e científico ao longo desta jornada.

Por fim, agradeço profundamente à minha Família pelo amor, incentivo e apoio incondicional em todas as etapas da minha vida. Sem o esforço, a compreensão e a confiança de cada um, esta conquista não teria se concretizado.

RESUMO

Esta pesquisa realizou uma revisão sistemática e uma análise bibliométrica abrangente sobre as tecnologias de captação de água atmosférica (Atmospheric Water Harvesting – AWH), com foco em seu enquadramento e potencial de aplicação nas condições climáticas do Semiárido Brasileiro. Foram analisados 1.562 artigos indexados nas bases Scopus e Web of Science, dos quais 362 atenderam aos critérios de inclusão estabelecidos pelo protocolo PRISMA. Os resultados indicaram um crescimento expressivo da produção científica a partir de 2020, impulsionado principalmente por grupos de pesquisa asiáticos e por estudos experimentais voltados ao desenvolvimento de materiais sorventes avançados, como metal–organic frameworks (MOFs), hidrogéis, aerogéis e compósitos contendo sais higroscópicos.Entre os 198 dispositivos identificados, a maioria (93%) baseou-se em tecnologias de sorção, que exploram a afinidade higroscópica dos materiais, enquanto apenas 7% utilizaram métodos ativos de resfriamento e condensação. De modo geral, os sistemas apresentaram desempenho eficiente em faixas de umidade relativa entre 20% e 60%, abrangendo condições áridas e semiáridas. Os dispositivos baseados em MOFs demonstraram estabilidade operacional mesmo sob umidades inferiores a 30%, enquanto hidrogéis e compósitos salinos mantiveram elevada capacidade de sorção em níveis intermediários, com dessorção passiva induzida por radiação solar, evidenciando a compatibilidade dessas tecnologias com ambientes de baixa disponibilidade hídrica.A análise espaço-temporal de dados climáticos provenientes de 110 estações automáticas do INMET, no período de 2004 a 2023, indicou umidade relativa média anual em torno de 58%, temperaturas médias superiores a 26 °C e regime pluviométrico concentrado entre os meses de novembro e abril. Com base nesses parâmetros, foi desenvolvido um modelo metodológico integrado fundamentado na Análise Hierárquica de Processos (AHP), que permitiu ponderar as variáveis climáticas e gerar um mapa de aptidão para a aplicação das tecnologias de sorção atmosférica. As áreas de maior potencial identificadas concentram-se no norte da Bahia, sertão de Pernambuco, sul do Piauí e norte de Minas Gerais, onde predominam condições favoráveis à aplicação de dispositivos baseados em sorventes, em função da baixa umidade relativa e da elevada insolação, que favorecem a dessorção solar. Por outro lado, regiões do Semiárido com maiores índices de umidade relativa, especialmente nas porções leste e de transição climática, mostram também potencial focados nos dispositivos de produção ativa e de resfriamento e condensação. De forma integrada, os resultados demonstram que as tecnologias de sorção atmosférica se configuram como uma alternativa complementar, descentralizada e ambientalmente sustentável para o fortalecimento da segurança hídrica e da resiliência climática no Semiárido Brasileiro.

Palavras-chave: Captação de água atmosférica; Tecnologias de sorção; Dessorção solar; Semiárido brasileiro; Segurança hídrica; Resiliência climática.

ABSTRACT

This study performed a comprehensive systematic review and bibliometric analysis of atmospheric water harvesting (AWH) technologies, focusing on their conceptual framework and potential applicability within the climatic conditions of the Brazilian semi-arid region. A total of 1,562 articles indexed in the Scopus and Web of Science databases were analyzed, of which 362 met the inclusion criteria established by the PRISMA protocol. The results indicated significant growth in scientific production since 2020, driven primarily by Asian research groups and experimental studies focused on the development of advanced sorbent materials, such as metal–organic frameworks (MOFs), hydrogels, aerogels, and hygroscopic salt composites. Among the 198 devices identified, the majority (93%) were based on sorption technologies, which exploit the hygroscopic affinity of materials, while only 7% utilized active cooling and condensation methods. Overall, the systems exhibited efficient performance within relative humidity ranges of 20% to 60%, covering both arid and semi-arid conditions. MOF-based devices demonstrated operational stability even under humidity levels below 30%, while hydrogels and salt composites maintained high sorption capacity at intermediate levels, with passive desorption induced by solar radiation, confirming the compatibility of these technologies with low water-availability environments. Spatio-temporal analysis of climatic data from 110 INMET automatic stations (2004–2023) indicated an average annual relative humidity of approximately 58%, mean temperatures above 26 °C, and a rainfall regime concentrated between November and April. Based on these parameters, an integrated methodological model was developed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to weight climatic variables and generate a suitability map for atmospheric sorption technologies. The areas with the highest potential were identified in northern Bahia, the Pernambuco sertão, southern Piauí, and northern Minas Gerais, where favorable conditions for sorbent-based devices prevail due to low relative humidity and high solar irradiance, which enhance solar desorption. Conversely, semi-arid regions with higher relative humidity, particularly in eastern and transitional zones, also show potential for active cooling and condensation-based devices. Integrated results demonstrate that atmospheric sorption technologies represent a complementary, decentralized, and environmentally sustainable alternative for strengthening water security and climate resilience in the Brazilian semi-arid region.

Keywords: Atmospheric water harvesting; Sorption based technologies; Solar desorption; Brazilian semi arid region; Water security; Climate resilience.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Classificação climática global segundo o sistema de Köppen-Geiger. 20
Figura 2. Distribuição global das regiões áridas e semiáridas. 22
Figura 3. Delimitação preliminar de áreas com características de clima árido no Brasil. 24
Figura 4. Fluxograma do processo de seleção dos estudos (PRISMA). 41
Figura 5. Publicações anuais sobre a sorção de água atmosférica. 42
Figura 6. Revistas com maior número de publicações sobre o tema. 43
Figura 7. Autores mais produtivos sobre o tema. 44
Figura 8. Termos mais recorrentes nos artigos sobre sorção de água atmosférica. 45
Figura 9. Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras-chave em publicações sobre sorção de água atmosférica 46
Figura 10. Distribuição percentual dos métodos de sorção de água atmosférica nos estudos analisados. 48
Figura 11. Métodos de dessorção nos estudos de sorção de água atmosférica (2011 a 2025). 49
Figura 12. Distribuição percentual dos materiais sorventes utilizados nos estudos de sorção de água atmosférica. 51
Figura 13. Distribuição percentual dos dispositivos de sorção com sorventes segundo a faixa de umidade relativa do ar utilizada nos estudos. 52
Figura 14. Valores médios de sorção de água atmosférica por materiais sorventes, conforme as diferentes faixas de umidade relativa utilizadas nos estudos analisados. 52
Figura 15. Diferentes delimitações do semiárido brasileiro em distintas escalas de análise. .. 54
Figura 16. Expansão territorial da região semiárida brasileira segundo o IBGE. 55
Figura 17. Delimitação atual do semiárido brasileiro. 56
Figura 18. Estações meteorológicas utilizadas na análise climática do semiárido brasileiro (2004–2023). 57
Figura 19. Precipitação média mensal no semiárido brasileiro. 59
Figura 20. Precipitação média anual no semiárido brasileiro. 60
Figura 21. Distribuição espacial da precipitação média no semiárido brasileiro. 61
Figura 22. Umidade média mensal no semiárido brasileiro. 62
Figura 23. Umidade média anual no semiárido brasileiro. 62
Figura 24. Distribuição espacial da umidade média no semiárido brasileiro. 63
Figura 25. Temperatura média mensal no semiárido brasileiro. 64
Figura 26. Temperatura média anual no semiárido brasileiro. 65

Figura 27. Distribuição espacial da temperatura média no semiárido brasileiro.....66
Figura 28. Média mensal da velocidade do vento no semiárido brasileiro. 67
Figura 29. Média anual da velocidade do vento no semiárido brasileiro. 68
Figura 30. Distribuição espacial das rajadas de vento no semiárido brasileiro. 69
Figura 31. Índice de Anomalia de Chuva no Semiárido.....70
Figura 32. Mapa Integrado das Variáveis Climáticas do Semiárido Brasileiro 75
Figura 33. Disponibilidade Hídrica na região do Semiárido Brasileiro 76
Figura 34. Tipos de materiais sorventes e predominância dos mecanismos de dessorção nos dispositivos de sorção atmosférica. 78
Figura 35. Distribuição da capacidade média de sorção (g g^{-1}) dos principais materiais empregados na sorção de água atmosférica em umidades abaixo de 60 %.....78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Intervalos e intensidades do Índice de Anomalia de Chuvas (IAC). 38
Tabela 2. Desempenho dos métodos sorção por resfriamento e condensação identificados nos estudos analisados 50
Tabela 3. Estações meteorológicas por estado na região semiárida. 58
Tabela 4. Intensidade dos Índices de Anomalias de Chuva no semiárido 71
Tabela 5. Principais compostos químicos empregados nos materiais sorventes e respectivas frequências de uso. 80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	=Análise Hierárquica de Processos
ANA	=Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ASA	=Articulação no Semiárido Brasileiro
AWG	=*Atmospheric Water Generators* (Geradores Atmosféricos de Água)
AWH	=*Atmospheric Water Harvesting* (Captação de Água Atmosférica)
CEMADEN	=Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
COF	=*Covalent Organic Framework* (Estrutura Orgânica Covalente)
EMBRAPA	=Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	=Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAC	=Índice de Anomalia de Chuvas
IDW	=*Inverse Distance Weighted* (Interpolador por Distância Inversa Ponderada)
INPE	=Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INSA	=Instituto Nacional do Semiárido
IPCC	=*Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
MDR	=Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional
MOF	=*Metal–Organic Framework* (Estrutura Metalorgânica)
OMM	=Organização Meteorológica Mundial
PAD	=Programa Água Doce
P1MC	=Programa Um Milhão de Cisternas
PNA	=Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima
PNRH	=Plano Nacional de Recursos Hídricos
PRISMA	=*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (Itens Preferenciais para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises)
RECHIDRO	=Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas
REHISA	=Rede de Hidrologia do Semiárido

SUDENE	=Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
TEC	=*Thermoelectric Cooler* (Módulo Termoelétrico)
UNEP	=*United Nations Environment Programme* (Programa das Nações =Unidas para o Meio Ambiente)
VCC	=*Vapor Compression Cycle* (Ciclo de Compressão de Vapor)
ZCIT	=Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15

2 OBJETIVOS 18

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19

3.1 REGIÕES CLIMÁTICAS 19

3.1.1 Regiões áridas e semiáridas 21

3.2 RECURSOS HÍDRICOS E SUA DISPONIBILIDADE NAS REGIÕES SEMIÁRIDAS 24

3.2.1 A disponibilidade hídrica no semiárido brasileiro 25

3.2.2 Impactos socioeconômicos da escassez de água 26

3.2.3 Medidas e políticas públicas para mitigar a escassez 26

3.3 ALTERNATIVAS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA EM REGIÕES COM ESCASSEZ 27

3.3.1 Dessalinização 27

3.3.2 Aproveitamento de águas subterrâneas 28

3.3.3 Captação de águas pluviais 28

3.3.4 Sorção de água atmosférica 29

3.3.5 Considerações sobre as alternativas de disponibilidade hídrica 30

3.4 SORÇÃO DE ÁGUA ATMOSFÉRICA 30

3.4.1 Dispositivos baseados em resfriamento 31

3.4.2 Dispositivos baseados em sorventes 32

3.4.3 Dispositivos ativos e passivos 32

4 MATERIAL E MÉTODOS 34

4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA E BIBLIOMÉTRICA 34

4.2 ANÁLISE SOBRE AS TECNOLOGIAS DE SORÇÃO E DESSORÇÃO DE ÁGUA ATMOSFÉRICA 35

4.3 LEVANTAMENTO ESPACIAL DAS REGIÕES DO ÁRIDO E SEMIÁRIDO 35

4.4 ANÁLISE DOS ASPECTOS CLIMÁTICOS INCIDENTES NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO 36

4.5 ANÁLISE SOBRE O ENQUADRAMENTO DA TECNOLOGIA DE SORÇÃO DE ÁGUA ATMOSFÉRICA AO SEMIÁRIDO BRASILEIRO 38

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 40

5.1 REVISÃO SISTEMÁTICA E ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA 40

5.1.1 Revisão Sistemática 40

5.1.2 Análise Bibliométrica 42

5.2 ANÁLISE DOS DISPOSITIVOS DE SORÇÃO-DESSORÇÃO DE ÁGUA ATMOSFÉRICA 46

5.2.1 Dispositivos baseados em resfriamento e condensação 49

5.2.2 Dispositivos baseados em sorção com sorventes ... *50*
5.3 LEVANTAMENTO ESPACIAL DE REGIÕES DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO ... 53
5.4 ANÁLISE DOS ASPECTOS CLIMÁTICOS INCIDENTES NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO ... 56
5.4.1 Precipitação ... *58*
5.4.2 Umidade do Ar ... *61*
5.4.3 Temperatura ... *64*
5.4.4 Velocidade dos Ventos ... *66*
5.4.5 Índice de Anomalias de Chuva ... *69*
5.5 AVALIAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DA TECNOLOGIA DE SORÇÃO DE ÁGUA ATMOSFÉRICA ÀS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO ... 72
5.5.1 Condições Climáticas do Semiárido Brasileiro e Potencial para a Sorção Atmosférica ... *73*
5.5.2 Dispositivos de sorção e adequação às variabilidades climáticas ... *77*
5.5.3 Aplicabilidade e Desafios Tecnológicos da Sorção de Água Atmosférica no Semiárido Brasileiro *81*
5.5.4 Considerações sobre a Aplicação da Sorção Atmosférica no Semiárido Brasileiro ... *84*
5.6 DISCUSSÃO GERAL ... 86
6 CONCLUSÃO ... 89
REFERÊNCIAS ... 91

1 INTRODUÇÃO

A água constitui um dos recursos naturais mais essenciais à manutenção da vida. Embora seja abundante no planeta, apenas cerca de 3% encontra-se na forma doce e disponível para o consumo humano (SOUZA, 2022). Diante dessa restrita fração, a oferta de água para toda a população tem se configurado como um desafio crescente. A escassez hídrica já afeta diversos países e tende a se agravar em razão do desaparecimento de fontes naturais, consequência direta do aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos associados ao aquecimento global. Além disso, a poluição desenfreada dos corpos hídricos reduz ainda mais o acesso à água potável (ZHANG et al., 2022).

Compreendendo essa problemática, cresce o interesse em encontrar soluções para a sorção de água atmosférica, uma vez que, em muitas localidades afetadas pela escassez, não há alternativas como a exploração de águas subterrâneas ou de geleiras. A falta de disponibilidade hídrica é particularmente grave em climas áridos e desérticos (KIM et al., 2018). Nesse contexto, a sorção de água atmosférica surge como alternativa promissora, com o objetivo de capturar a água presente no ar e disponibilizá-la diretamente no ponto de uso (ZHANG et al., 2022).

De acordo com Kiliç (2020), a atmosfera é parte fundamental do ciclo natural da água. Nela ocorrem processos como evaporação e transpiração, por meio dos quais grandes volumes de água provenientes de plantas e corpos hídricos são liberados para o ar na forma de vapor. Esse vapor se condensa, formando nuvens ou nevoeiros, e, de modo passivo e intermitente, retorna à superfície por meio da precipitação. Com o avanço de novas técnicas, busca-se agora extrair essa água ainda em sua forma gasosa, de acordo com as condições locais de umidade relativa do ar.

Estudos sobre a sorção de água atmosférica vêm sendo conduzidos há décadas. Há registros desde a década de 1940, quando Tygarinov, na Rússia, liderou o primeiro projeto voltado a essa temática: “Um Equipamento para Coletar Água do Ar”, em 1947. O aparelho consistia em um sistema de canais verticais e inclinados no solo, destinado a resfriar o ar úmido abaixo do ponto de orvalho, promovendo a coleta da água atmosférica (VINAY et al., 2018). Desde então, essas pesquisas têm sido aprimoradas e abrangem faixas de umidade atmosférica que variam desde índices críticos (abaixo de 40%) até condições mais úmidas (acima de 80%), alcançando taxas máximas de coleta em torno de 200.000 L/dia.

Esse tipo de tecnologia surge como alternativa aos métodos convencionais de obtenção de água, uma vez que a sorção de água atmosférica dispensa a necessidade de grandes infraestruturas cinzentas de armazenamento e distribuição. Além de representar uma alternativa viável para o abastecimento de água potável, também pode constituir uma solução para o setor agrícola em regiões com infraestrutura de irrigação limitada, mas com níveis moderados de umidade (ZHANG et al., 2022).

Atualmente, são conhecidas diversas formas de sorção de água atmosférica. Uma delas é o uso de coletores de nevoeiro passivos, que consistem em malhas planas esticadas sobre estruturas rígidas. Quando o vento passa pela malha, as gotículas de água da neblina aderem à superfície e coalescem, formando gotas maiores que escorrem até reservatórios coletores. Esse método tem se mostrado eficiente, especialmente em regiões com alta umidade relativa do ar (CRUZAT e HANCKLES, 2018; CARVAJAL et al., 2020).

Outro método envolve a sorção por refrigeração, aplicável em locais com umidade relativa entre 30% e 80%. Esse sistema busca condensar artificialmente o vapor d'água presente no ar, purificá-lo e coletá-lo. A quantidade de água captada varia conforme a umidade do ambiente e a potência dos equipamentos de refrigeração empregados (HAO et al., 2017).

Contudo, tecnologias baseadas na condensação de orvalho não são eficientes em condições de baixa umidade (abaixo de 40%). Sistemas que utilizam energia elétrica para resfriar grandes volumes de ar demandam alto consumo energético nessas situações, pois o gasto aumenta à medida que a temperatura ambiente se eleva e/ou a umidade relativa diminui (SILVA, 2018). Nesses contextos, uma alternativa é o uso de materiais sorventes, capazes de capturar água diretamente do ar, como zeólitas e sílica gel. Em geral, esses sistemas utilizam energia solar térmica para aquecer o material e liberar a água armazenada (KIM et al., 2018).

Kim et al. (2018) demonstraram a coleta de água atmosférica por sorção de vapor utilizando estruturas metal orgânicas porosas (MOF-801, $Zr_6O_4(OH)_4$(fumarato)$_6$) em ambiente de baixa umidade relativa (até 20%), característica de regiões áridas. O dispositivo proposto produziu cerca de 2,8 L de água por quilograma de MOF por dia, sob radiação solar inferior a 1 sol (1 kW m^{-2}), sem necessidade de energia elétrica adicional, operando em temperatura ambiente ao ar livre.

Ampliar os estudos voltados ao uso de materiais e métodos alternativos para captação e aproveitamento de água atmosférica revela-se de importância estratégica, especialmente diante da intensificação dos eventos climáticos extremos e da crescente pressão sobre os recursos hídricos globais. Tais sistemas configuram-se como soluções promissoras para a obtenção e distribuição de água em comunidades que enfrentam escassez, sobretudo nas regiões áridas e

semiáridas do planeta, onde a irregularidade das chuvas e a limitação de fontes superficiais e subterrâneas comprometem a segurança hídrica. No contexto brasileiro, esse quadro manifesta-se de forma marcante no Semiárido, que abrange grande parte do Nordeste e avança em direção à região Sudeste, caracterizando-se por longos períodos de estiagem, baixa disponibilidade hídrica e severos impactos socioeconômicos e ambientais (SUDENE, 2021; ANA, 2023).

2 OBJETIVOS

Investigar tecnologias de sorção de água atmosférica descritas na literatura internacional, analisando seu potencial de aplicação nas regiões semiáridas do Brasil, com base na espacialização de parâmetros climáticos como: velocidade do vento, precipitação, temperatura e, principalmente, umidade relativa do ar.

2.1 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão sistemática sobre os métodos de sorção e dessorção de água atmosférica, em escala global;
- Identificar e descrever os dispositivos empregados nos processos de sorção e dessorção, destacando seus princípios de funcionamento e materiais utilizados;
- Analisar o desempenho e a eficiência dessas tecnologias em diferentes condições climáticas;
- Coletar e espacializar dados meteorológicos (precipitação, temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar) referentes às regiões semiáridas do Brasil;
- Caracterizar e interpretar os padrões climáticos do semiárido brasileiro, a partir da variação espaço-temporal dos parâmetros meteorológicos;
- Avaliar o enquadramento e a viabilidade de aplicação das tecnologias de sorção atmosférica, considerando as características climáticas da área de estudo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

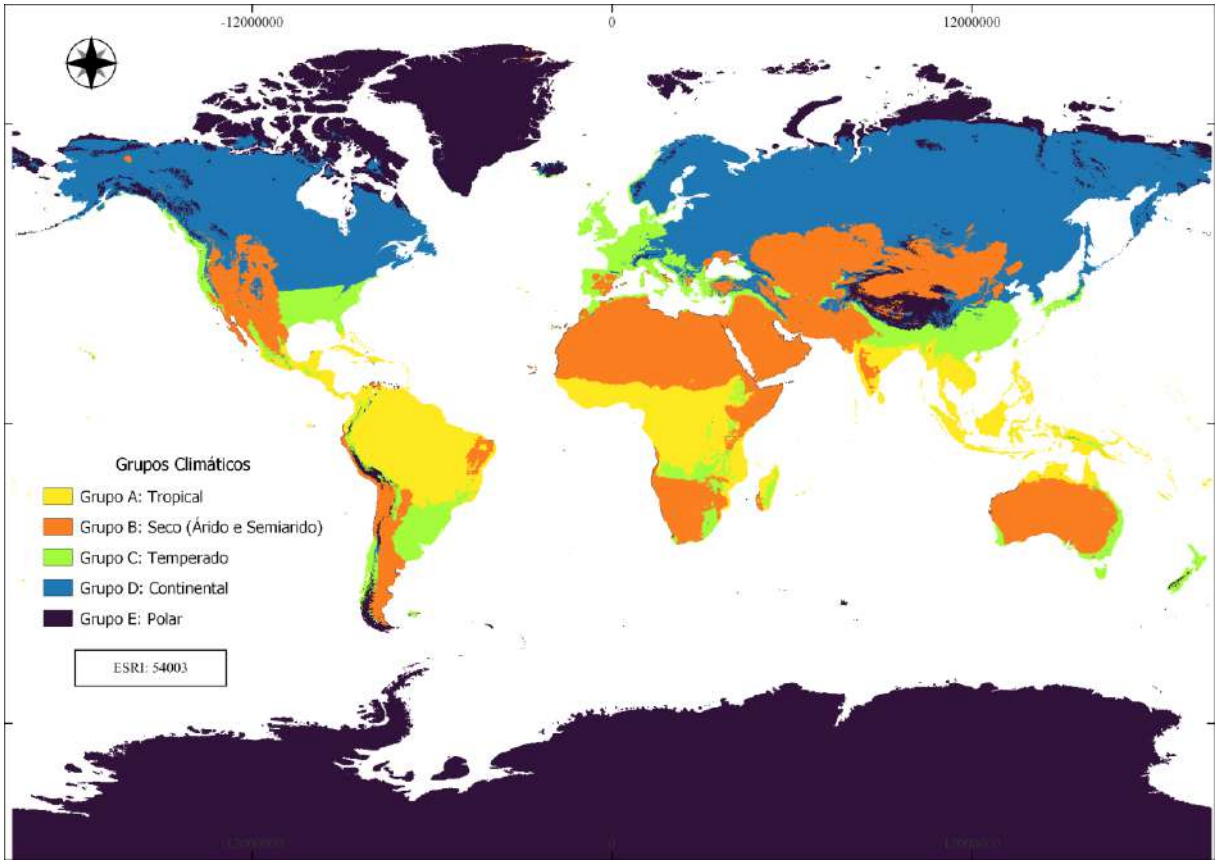
3.1 Regiões climáticas

Ao redor do mundo, observam-se diversas variações e classificações climáticas, resultantes de diferentes fatores naturais e geográficos. Dentre essas classificações, uma das mais consolidadas e amplamente utilizadas é a classificação de Köppen-Geiger, considerada uma das mais completas para o estudo do clima. Embora tenha sido desenvolvida por volta da década de 1930, essa tipologia permanece como base para estudos climáticos e ainda é amplamente empregada na atualidade.

Essa classificação constitui uma ferramenta integrada e conveniente para representar os padrões espaciais da distribuição climática em escala global, além de possibilitar a identificação de relações entre o clima e os sistemas físicos e biológicos da Terra (CUI; LIANG; WANG, 2021). Ela se fundamenta, principalmente, no ciclo anual de dados mensais de temperatura do ar e precipitação. Contudo, ao longo do tempo, demonstrou também forte correlação com a distribuição de biomas, ecossistemas e variações altimétricas (ROHLI et al., 2015).

Conforme se observa na Figura 1, a classificação de Köppen-Geiger organiza as regiões do globo em cinco principais grupos climáticos, com base nos padrões anuais de temperatura e precipitação:

Figura 1. Classificação climática global segundo o sistema de Köppen-Geiger.



Fonte: Adaptado de Beck et al., 2023

Com base na classificação apresentada, cada grupo climático é descrito conforme suas condições térmicas e pluviométricas, bem como sua distribuição geográfica no globo:

- **Grupo A – Tropical**: caracterizado por temperaturas médias mensais acima de 18 °C e elevados índices de precipitação. A variação no volume de chuvas ao longo do ano define os subgrupos: clima equatorial, clima de monção e clima de savana. As regiões incluídas neste grupo localizam-se, majoritariamente, ao sul da linha do Equador, abrangendo grande parte da América do Sul, África e sul da Ásia.
- **Grupo B – Seco**: marcado por altas temperaturas médias e baixos índices de precipitação anual. Subdivide-se em climas áridos e semiáridos, conforme o grau de escassez hídrica. Essas regiões localizam-se principalmente nas proximidades dos trópicos de Câncer e Capricórnio, como o norte da África, partes da América Central, Oriente Médio e Ásia Central. Também ocorrem em áreas do sul da África, interior da América do Sul e partes da Austrália, onde as condições geográficas favorecem a aridez, mesmo fora das zonas tropicais.

- **Grupo C – Temperado**: presente em regiões mais afastadas do Equador, apresenta grande diversidade de subgrupos, como subtropical úmido, oceânico e mediterrâneo, devido à variabilidade sazonal e às influências geográficas locais. Apesar de ser o grupo climático de menor extensão territorial, abriga a maior densidade populacional do planeta, por oferecer condições climáticas mais amenas e propícias à ocupação humana.
- **Grupo D – Continental**: predominante no Hemisfério Norte, especialmente em latitudes médias a altas, é caracterizado por invernos rigorosos, com temperaturas médias que podem se aproximar ou permanecer abaixo de 0 °C por longos períodos. Seus subgrupos incluem o subártico, o continental úmido e o continental frio.
- **Grupo E – Polar**: representa os climas mais frios do planeta, com temperaturas médias anuais próximas ou inferiores a 0 °C. Abrange os extremos do globo, sendo subdividido em clima de tundra e clima glacial, conforme o grau de congelamento e a presença ou ausência de cobertura vegetal.

3.1.1 Regiões áridas e semiáridas

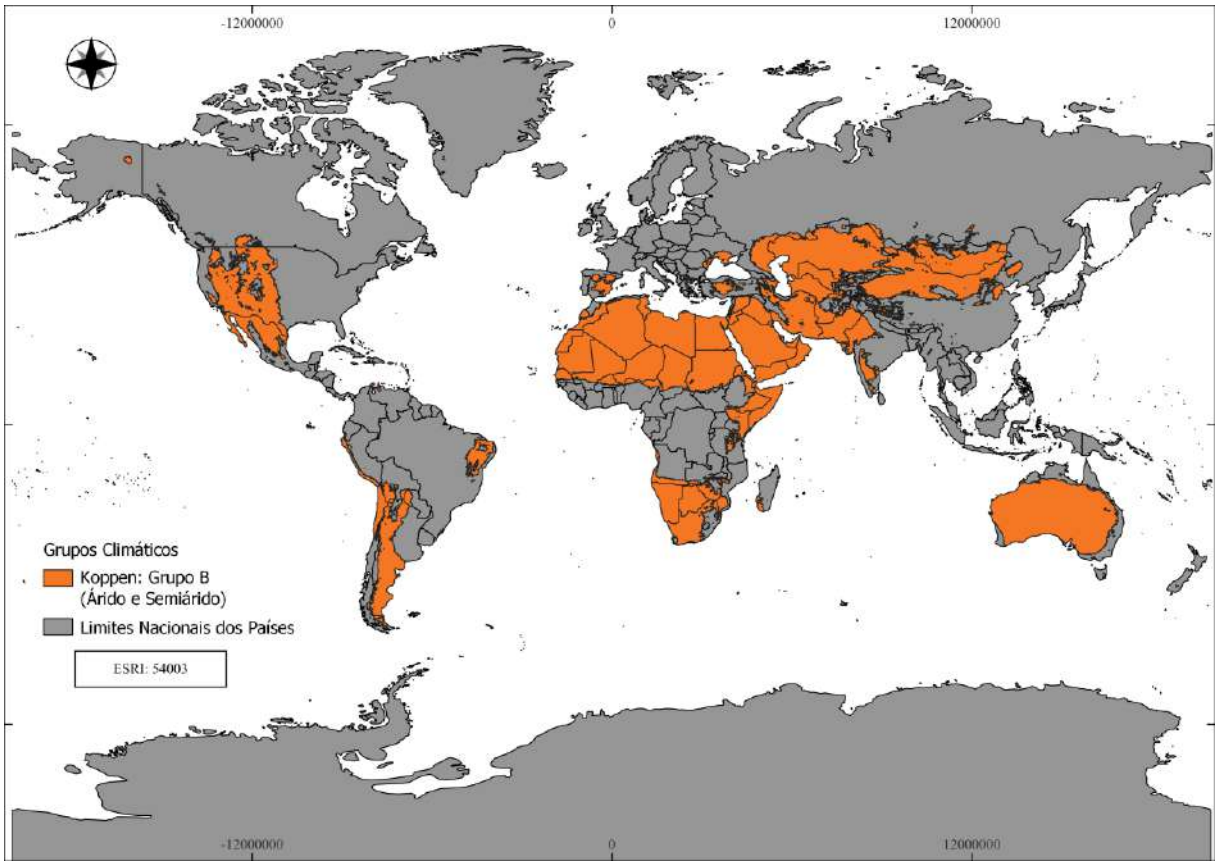
Entendendo a distribuição das classificações climáticas e correlacionando com o foco principal desta pesquisa que é analisar os padrões de escassez hídrica e oferecer uma alternativa de acesso à água para localidades afetadas por esse fenômeno, ocasionalmente provocado por fatores climáticos, o destaque recai sobre a região que mais se enquadra nesses termos, ou seja, o Grupo B, com uma classificação seca, definida pelos climas árido e semiárido.

Apesar de seus ricos recursos ecológicos e do potencial para o desenvolvimento, os ecossistemas áridos e semiáridos enfrentam desafios significativos, como a escassez de água, que contribui para a erosão do solo, fragmentação da terra, desertificação, baixa cobertura vegetal e a presença de ecossistemas frágeis (KOLARIK et al., 2023). Corroborando essas informações, Kordesofla e Abna (2023) destacam que, além dos aspectos climáticos adversos, as localidades inseridas nesse grupo enfrentam ainda maiores dificuldades, uma vez que o abastecimento de água é severamente limitado, especialmente devido à expansão populacional.

Como apresentado na Figura 2, as regiões áridas e semiáridas estão presentes em todos os continentes, abrangendo uma grande quantidade de países (UNEP, 2019). A depender de suas localizações geográficas, essas regiões apresentam diferentes graus de intensidade na classificação climática, variando entre áreas totalmente áridas, como o Deserto do Saara, no norte da África, e o Deserto do Atacama, no norte do Chile, e áreas caracterizadas como

semiáridas, que, apesar da escassez hídrica, apresentam condições climáticas relativamente mais amenas, como ocorre no Nordeste do Brasil e em outros países, como a Espanha (IPCC, 2022).

Figura 2. Distribuição global das regiões áridas e semiáridas.



Fonte: Adaptado de Beck et al., 2023

No Brasil, como mencionado anteriormente, ocorre a presença do clima seco (Grupo B), especialmente o clima semiárido, predominante na região Nordeste do país. Esse clima está associado a uma frequência irregular de precipitação, resultando em variabilidade significativa no regime de chuvas ao longo das décadas. Segundo Brandão e Tavares (2020), a situação climática da região é regida por sistemas atmosféricos vinculados à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que exerce controle direto sobre a precipitação no setor norte do Nordeste brasileiro. Durante o verão austral, faixas de nuvens migram para o Hemisfério Sul, causando instabilidades atmosféricas e promovendo chuvas convectivas na área de estudo, especialmente entre os meses de dezembro a maio. Esse regime de chuvas convectivas, de acordo com Dedecék (1988), caracteriza-se por ser de curta duração, alta intensidade, mas com baixo volume acumulado, o que pode ser insuficiente para atender à demanda hídrica da região.

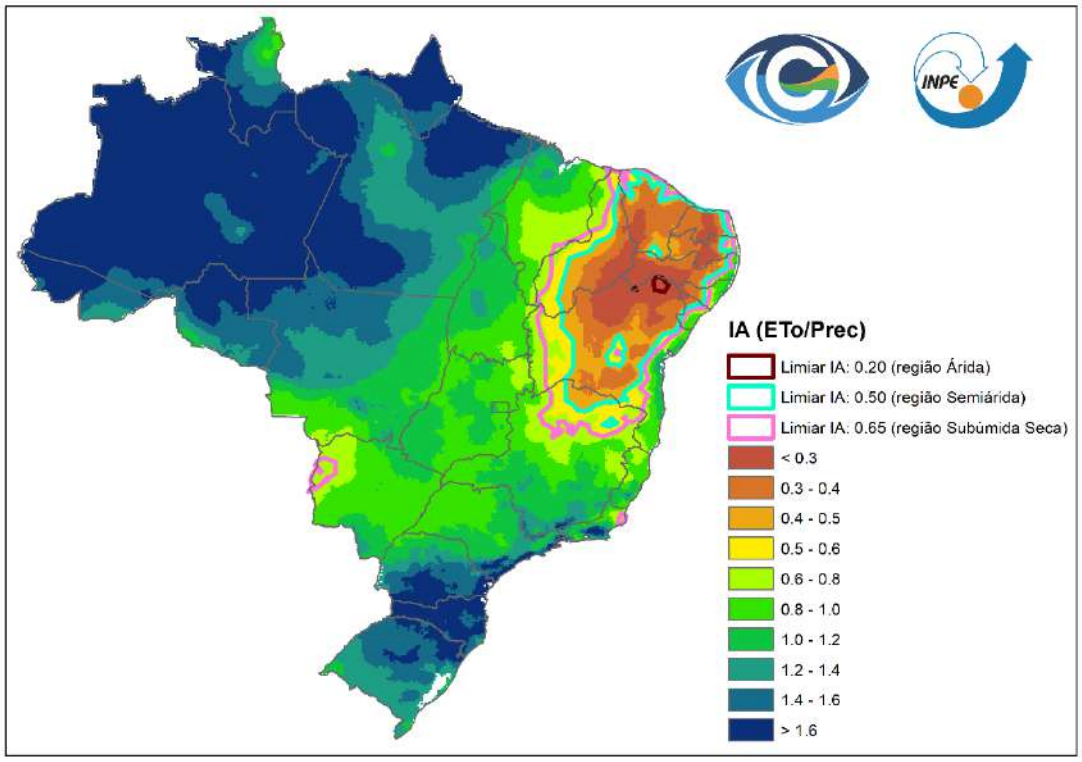
A delimitação de regiões com características áridas e semiáridas é um elemento essencial para a compreensão das classificações climáticas e das dinâmicas atmosféricas regionais. No caso brasileiro, embora o país não possua áreas oficialmente reconhecidas como de clima árido, a região semiárida é amplamente conhecida e estudada, sendo caracterizada por baixos índices pluviométricos, elevadas taxas de evapotranspiração e alta variabilidade interanual das chuvas (IPCC, 2022).

A região semiárida do Brasil, localizada predominantemente no Nordeste, tem apresentado expansão territorial nas últimas décadas, conforme novas metodologias e critérios técnicos são incorporados às políticas públicas de delimitação (IBGE, 2021). Essa área representa um dos espaços mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas no país. O aumento da temperatura média, a intensificação das ondas de calor, a redução da precipitação e o prolongamento da estação seca têm provocado alterações significativas no balanço hídrico regional, comprometendo os volumes de armazenamento em reservatórios, como açudes e pequenos lagos, além de elevar as taxas de evaporação e evapotranspiração (MARGARIDO; TOMINAGA; SOUZA, 2020).

Diante desse cenário de agravamento climático, estudos recentes têm apontado para o surgimento de zonas com condições que se aproximam do clima árido. De acordo com pesquisa desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em parceria com o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), divulgada em 2023, determinadas áreas entre os estados da Bahia e Pernambuco já apresentam indicadores climáticos compatíveis com tipologias áridas. A pesquisa tem sido amplamente divulgada por veículos como O Globo e Revista Fapesp, e representa um marco no debate sobre a possível emergência de climas áridos no território nacional, anteriormente inexistentes em delimitações oficiais.

A Figura 3 apresenta o mapa divulgado pelos referidos institutos, com a delimitação preliminar das áreas que, segundo os critérios adotados, já apresentam condições climáticas similares às de regiões áridas.

Figura 3. Delimitação preliminar de áreas com características de clima árido no Brasil.



Fonte: INPE/CEMADEN (2023).

A Figura 3, disponibilizada no portal do Governo Federal, integra um estudo técnico que subsidia o Plano Nacional de Combate à Desertificação, instituído pela Lei nº 13.153, de 30 de julho de 2015. Essa legislação estabelece a Política Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca, define seus instrumentos e prevê a criação da Comissão Nacional de Combate à Desertificação. A incorporação desse estudo às estratégias governamentais demonstra o reconhecimento institucional da intensificação das condições climáticas extremas no Semiárido brasileiro, evidenciando a necessidade de planejamento territorial orientado por evidências científicas. Além disso, reforça a urgência de políticas públicas integradas voltadas à mitigação dos processos de aridização progressiva e de seus impactos socioambientais, que comprometem tanto a resiliência das populações locais quanto a sustentabilidade ecológica dos ecossistemas regionais.

3.2 Recursos Hídricos e sua Disponibilidade nas Regiões Semiáridas

A disponibilidade de recursos hídricos em regiões semiáridas constitui um dos principais desafios ambientais em escala global. Aproximadamente um terço da superfície

terrestre corresponde a áreas áridas e semiáridas, onde vive grande parte da população mais vulnerável, predominantemente em zonas rurais (EZZAHAR et al., 2007). Nessas regiões, o acesso à água é limitado por condições climáticas, geológicas e de uso do solo, resultando em déficit hídrico persistente (DESCHEEMAEKER et al., 2010).

A limitação hídrica decorre de fatores como altas taxas de evaporação, solos rasos e cristalinos, e precipitação irregular concentrada em poucos meses do ano, o que acarreta rios intermitentes e dificuldade de armazenamento de água, especialmente em pequenas bacias hidrográficas (ALADOS et al., 2011; POKHAREL, 2007). Mesmo assim, a demanda por água é elevada e abrange múltiplos setores, agricultura, indústria e centros urbanos, gerando competição entre os diferentes usos (ALI; TALUKDER, 2008).

Segundo Soares e Campos (2013), a escassez hídrica nessas áreas não é apenas sazonal, mas permanente, afetando diretamente o desenvolvimento regional. A baixa densidade de rios perenes e a falta de infraestrutura adequada para armazenamento e distribuição agravam o quadro, tornando a gestão dos recursos hídricos um fator determinante para a sustentabilidade ambiental e socioeconômica dessas regiões.

3.2.1 A disponibilidade hídrica no semiárido brasileiro

O semiárido brasileiro abrange uma área aproximada de 969.589 km², distribuída por nove estados da Região Nordeste e por parte do norte do estado de Minas Gerais. A região é predominantemente ocupada pelo bioma Caatinga, caracterizado por vegetação xerófila adaptada às condições de escassez hídrica. Quanto ao regime pluviométrico, a precipitação média anual é marcada por elevada irregularidade temporal e espacial, podendo atingir, em determinadas áreas, valores em torno de 432 mm, conforme apontado por alguns autores (MATA, 2020; AESA, 2016).

A alta evapotranspiração e a distribuição irregular das chuvas comprometem o balanço hídrico regional, afetando o abastecimento humano, a produção agrícola e as atividades econômicas. Apesar disso, o semiárido conta com reservas subterrâneas importantes, como o Sistema Aquífero Jandaíra, cujo aproveitamento ainda é limitado por infraestrutura insuficiente e baixa capacidade técnica local (SOARES; CAMPOS, 2013).

De acordo com a EMBRAPA (2023), a principal fonte de abastecimento hídrico da região é composta por pequenos açudes e barreiros, frequentemente vulneráveis ao assoreamento e à evaporação intensa. A ineficiência dos sistemas de captação, armazenamento

e distribuição reforça a necessidade de tecnologias adaptadas à realidade semiárida, voltadas à gestão e ao uso sustentável da água.

Na região, a agricultura familiar depende majoritariamente da chamada “água verde”, proveniente da umidade do solo gerada pela chuva, especialmente para o cultivo de milho e feijão em regime de sequeiro. A pegada hídrica desses cultivos varia conforme a precipitação, o tipo de solo e o manejo agrícola, evidenciando a vulnerabilidade da produção frente à variabilidade climática e à limitação dos recursos hídricos disponíveis (SOARES; CAMPOS, 2013).

3.2.2 Impactos socioeconômicos da escassez de água

A escassez de recursos hídricos impacta diretamente as condições de vida da população semiárida. Além de comprometer o abastecimento humano, afeta a segurança alimentar, a geração de renda e a permanência das famílias no campo. A falta de água para consumo e produção empurra milhares de pessoas para a migração sazonal ou definitiva, agravando os problemas urbanos e sociais (SILVA et al., 2016).

Rêgo (2008), Morales e Antônello (2004) reforçam que a agricultura, principal atividade econômica da região, é altamente vulnerável. Mesmo com técnicas de irrigação que aumentam a produtividade, surgem novos problemas, como salinização dos solos e contaminação de aquíferos, o que exige maior planejamento e regulação do uso dos recursos.

Estudos desenvolvidos no âmbito do Programa REHIDRO, inserido no REHISA- Rede de Hidrologia do Semiárido, mostram que a vulnerabilidade hídrica do semiárido é muita das vezes intensificada pela ausência de políticas integradas de uso do solo e dos recursos hídricos (EMBRAPA, 2023). Essa fragmentação institucional prejudica o aproveitamento do potencial hídrico disponível e limita a resiliência dos sistemas de produção rural.

3.2.3 Medidas e políticas públicas para mitigar a escassez

No Brasil, diversas iniciativas têm sido implementadas com o objetivo de ampliar a disponibilidade hídrica e garantir a segurança econômica e de acesso a água no semiárido. A Articulação no Semiárido Brasileiro (ASA), rede que integra ONGs, sindicatos e entidades civis, ganhou destaque com a implantação de mais de um milhão de cisternas domiciliares por

meio do programa P1MC (Um Milhão de Cisternas), com o objetivo de ampliar o acesso à água potável (CAMPOS, 2014).

Outras políticas importantes incluem os programas Bolsa Família, Luz para Todos, Pronaf e a Reforma Agrária, que contribuem indiretamente para a permanência das famílias rurais, ao lado de obras estruturantes como a Transposição do Rio São Francisco, que busca regularizar a oferta de água em territórios vulneráveis.

O Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), coordenado pela Agência Nacional de Águas (ANA), também tem sido um instrumento relevante para orientar a gestão integrada e descentralizada da água no país. Entretanto, a efetividade das ações ainda encontra barreiras institucionais, técnicas e financeiras e segue de maneira lenta (EMBRAPA, 2023).

Considerando que a escassez hídrica, mesmo com estes variados programas de apoio e incentivo, permanece como um problema estrutural nas regiões semiáridas, torna-se imprescindível avançar na busca por novas alternativas tecnológicas e estratégias sustentáveis para ampliar a disponibilidade de água e garantir a resiliência das comunidades locais. Conforme destaca Tundisi (2008), o enfrentamento da crise hídrica no semiárido brasileiro exige não apenas infraestrutura, mas também inovação, gestão participativa e educação ambiental como pilares fundamentais para a adaptação ao novo cenário climático.

3.3 Alternativas de Captação de Água em Regiões com Escassez

A escassez hídrica é uma realidade persistente em diversas regiões do mundo, especialmente nas áreas áridas e semiáridas, onde a distribuição pluviométrica é irregular e os recursos naturais disponíveis são limitados (CABRAL et al., 2013). Diante desse cenário, a adoção de alternativas para captação, armazenamento e uso eficiente da água tornou-se essencial para garantir a segurança hídrica, alimentar e o desenvolvimento sustentável dessas regiões (CABRAL et al., 2013; LUCENA et al., 2018). Este tópico apresenta as principais estratégias utilizadas para mitigar os efeitos da escassez, principalmente considerando a situação em região brasileira.

3.3.1 Dessalinização

A dessalinização da água do mar ou de águas salobras tem sido amplamente discutida como alternativa viável em regiões litorâneas ou com aquíferos salinos (Lopes et al., 2020). No

Brasil, essa técnica já é utilizada, sobretudo no semiárido nordestino, por meio do Programa Água Doce (PAD), coordenado pelo Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MDR). Até 2025, o programa já havia instalado mais de 1.100 sistemas de dessalinização em 298 municípios da região (MDR, 2025a; MDR, 2025b).

Apesar de se mostrar em expansão, a dessalinização ainda enfrenta obstáculos que dificultam sua ampliação, como altos custo de operação e manutenção, uma demanda energética elevada e até desafios ambientais relacionados à disposição do rejeito salino (ÁGUA SUSTENTÁVEL, 2023; LOPES et al., 2020). Em muitos casos, a logística de transporte e distribuição da água tratada também se aponta como um gargalo, especialmente em comunidades isoladas e de difícil acesso, algo frequento no semiárido brasileiro. Além disso, iniciativas como o uso de caminhões-pipa continuam sendo predominantes em várias áreas do Nordeste, o que evidencia que a dessalinização, embora promissora, ainda não substitui por completo as estratégias emergenciais tradicionais (ÁGUA SUSTENTÁVEL, 2023).

3.3.2 Aproveitamento de águas subterrâneas

As águas subterrâneas são outra alternativa que representam uma fonte estratégica no abastecimento em regiões com baixa disponibilidade superficial (LOPES et al., 2020). Aquíferos como o Jandaíra e o Cristalino, presentes no semiárido brasileiro, armazenam volumes expressivos de água, ainda que, muitas vezes, com grau de salinidade elevado (SOARES e CAMPOS, 2013). Porém o acesso a esses recursos é limitado pela ausência de infraestrutura, pela baixa capacidade técnica local, e pela falta de estudos hidrogeológicos atualizados (SOARES e CAMPOS, 2013).

Segundo o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA), na Estratégia de Recursos Hídricos, o aproveitamento sustentável dos aquíferos requer ações integradas de mapeamento, monitoramento e gestão participativa, a fim de evitar tanto a superexploração como a própria contaminação dessas fontes (ANA, 2019). Além disso, a perfuração de poços e instalação de bombas envolve custos elevados, o que restringe o acesso à água subterrânea para populações de baixa renda (LOPES et al., 2020).

3.3.3 Captação de águas pluviais

A coleta e armazenamento de águas de chuva, por meio de cisternas e reservatórios, é até então uma das estratégias mais difundidas no semiárido brasileiro. Projetos como o “Um Milhão de Cisternas”, promovido pela Articulação no Semiárido Brasileiro (ASA), demonstraram eficiência na garantia de água potável para consumo humano, sobretudo em áreas rurais (CAMPOS, 2014).

Além do uso doméstico, o aproveitamento da água da chuva tem sido também incentivado em escolas, unidades de saúde e centros comunitários, contribuindo para a autonomia hídrica de comunidades e a redução da dependência de caminhões-pipa. No entanto, a sazonalidade das chuvas e a limitação da capacidade de armazenamento exigem a adoção de estratégias complementares, quando o acesso a essa água se esgota (CAMPOS, 2014).

Recentemente, iniciativas voltadas ao uso de geotecnologias para otimizar a captação de água da chuva em áreas em processo de desertificação vêm sendo desenvolvidas, como mostra o projeto apresentado por pesquisadores da Universidade Federal da Paraíba (LETRAS AMBIENTAIS, 2023).

3.3.4 Sorção de água atmosférica

A água atmosférica representa uma fronteira tecnológica promissora para o enfrentamento a essa escassez hídrica. Esta trata-se da extração de água diretamente do vapor presente na atmosfera, utilizando diferentes métodos, como condensação por resfriamento, sorção por materiais higroscópicos e outras técnicas termoquímicas (INSA, 2023).

No Brasil, é informado que o Instituto Nacional do Semiárido (INSA) coordena projetos voltados ao estudo e aplicação desses dispositivos de sorção atmosférica, como o “Água Atmosférica: Bebendo Água do Ar”. A proposta do instituto é implementar tecnologias de baixo custo capazes de fornecer água potável em áreas onde outras fontes estão comprometidas. Embora ainda em fase experimental, essas tecnologias têm o objetivo de serem testadas com resultados promissores, primordialmente em escolas e comunidades isoladas do semiárido (INSA, 2023).

Pesquisas apontam que a captação de água do ar pode ser especialmente útil durante os períodos mais secos do ano, quando há aumento da umidade relativa noturna, o que favorece a eficiência de certos dispositivos, como coletores de orvalho ou estruturas com materiais porosos (LETRAS AMBIENTAIS, 2023).

3.3.5 Considerações sobre as alternativas de disponibilidade hídrica

A diversidade de alternativas disponíveis discutidas até então, demonstra que não há uma única solução para a escassez de água em regiões áridas e semiáridas. Cada estratégia possuí suas vantagens e limitações que devem ser consideradas conforme o contexto local, os recursos disponíveis e a capacidade institucional de gestão (TUNDISI, 2008).

Enquanto alternativas como a dessalinização e a captação de águas subterrâneas demandam infraestrutura complexa e investimentos significativos, métodos como o aproveitamento da água da chuva e a sorção atmosférica apresentam maior viabilidade em pequena escala, especialmente considerando o consumo doméstico (LOPES et al., 2020; CAMPOS, 2014). Entretanto, como a crise hídrica continua a se agravar com as mudanças climáticas, torna-se urgente o investimento em pesquisas, inovação tecnológica e políticas públicas que valorizem soluções integradas e sustentáveis (TUNDISI, 2008).

Tundisi (2008), ressalta que o enfrentamento dos desafios hídricos exige uma abordagem multiescala, envolvendo educação ambiental, gestão participativa e, sobretudo, o fortalecimento das capacidades locais. A sorção de água atmosférica, nesse contexto, deve ser vista não como substituição das demais fontes, mas também como uma alternativa complementar estratégica que merece maior atenção por parte dos gestores públicos e da comunidade científica.

3.4 Sorção de Água Atmosférica

A busca por alternativas viáveis de abastecimento de água tem se intensificado nas últimas décadas, especialmente em regiões que enfrentam severa escassez hídrica, como áreas áridas e semiáridas. Nesse contexto, a sorção de água atmosférica, mundialmente conhecida como *Atmospheric Water Harvesting* (AWH), tem emergido como uma possibilidade concreta, uma vez que permite capturar a umidade presente no ar, independentemente de fontes hídricas superficiais ou subterrâneas. Estima-se que a atmosfera contenha cerca de 50.000 km³ de água em forma de vapor, o que representa uma fração significativa da água doce do planeta (ZHAO et al., 2019; ZHOU et al., 2020). Essa água, embora invisível, está em constante movimento no

ciclo hidrológico e pode ser convertida em líquido por meio de tecnologias apropriadas (LU et al., 2022; GIDO et al., 2016).

A técnica de AWH tem sido amplamente discutida na literatura científica, tanto do ponto de vista dos materiais utilizados quanto da eficiência energética envolvida no processo. Por ser uma tecnologia descentralizada, que dispensa grandes redes de distribuição e pode operar em diferentes condições ambientais, ela tem chamado a atenção de pesquisadores e gestores públicos, principalmente para aplicação em comunidades isoladas ou que enfrentam dificuldades de acesso a fontes convencionais de água (AGYEKUM et al., 2024).

3.4.1 Dispositivos baseados em resfriamento

Uma das formas mais utilizadas de realizar a sorção de água atmosférica é por meio do resfriamento do ar até que ele atinja o ponto de orvalho, momento em que o vapor de água condensa e se transforma em líquido. Esse princípio, semelhante ao funcionamento de desumidificadores e aparelhos de ar-condicionado, é aplicado em dispositivos conhecidos como *Atmospheric Water Generators* (AWG) (SALEHI et al., 2020; MAGRINI et al., 2017). Esses sistemas geralmente operam com ciclos de compressão de vapor (VCC) ou com módulos termoelétricos (TEC), e sua eficiência está diretamente relacionada à umidade relativa do ar e à temperatura ambiente (BEITHOU et al., 2024).

Na prática, esses dispositivos são capazes de produzir de 8 a mais de 10.000 litros de água por dia, dependendo do porte e das condições climáticas locais (BEITHOU et al., 2024). Entretanto, um dos desafios recorrentes dessa tecnologia está ligado ao elevado consumo energético. Em estudos de Kwan et al. (2022), foi verificado que o gasto de energia pode variar entre 0,211 e 1,3 kWh por litro de água produzida, o que pode inviabilizar o uso em regiões com limitações de acesso à eletricidade e áreas mais carentes.

Para superar esse entrave, diversas estratégias têm sido propostas, como o uso de fontes de energia renováveis, por exemplo, a energia solar ou até a integração com sistemas híbridos que utilizem calor residual (AGRAWAL et al., 2023). Alguns estudos, como o de Cendoya et al. (2023), desenvolveram modelos computacionais que demonstram uma significativa economia de energia ao combinar rodas dessecantes com trocadores de calor e ciclos de refrigeração otimizados, especialmente em regiões quentes e secas.

3.4.2 Dispositivos baseados em sorventes

Em contrapartida aos métodos de resfriamento direto, outra abordagem bastante promissora envolve o uso de materiais sorventes, capazes de capturar a umidade do ar por meio da combinação de processos de sorção e dessorção. Esses materiais vêm sendo amplamente investigados por apresentarem vantagens como operação em faixas amplas de umidade e menor dependência energética (CHEN et al., 2022).

Diversos tipos de sorventes têm sido explorados, como os sais higroscópicos (por exemplo, cloreto de cálcio), os hidrogéis, sílica gel, aerogéis, polímeros sintéticos, biopolímeros e, principalmente, os chamados *metal-organic frameworks* (MOFs), conhecidos por sua estrutura altamente porosa e seletiva, que permite captar vapor mesmo em baixas umidades (FURUKAWA et al., 2013; HANIKEL et al., 2021; FATHIEH et al., 2018).

Um aspecto importante desses sistemas é a possibilidade de operar em ciclos múltiplos ao longo do dia. Dispositivos multicíclicos podem captar a umidade à noite, quando a umidade relativa tende a ser mais elevada e liberar a água durante o dia por meio de aquecimento, seja solar ou elétrico. Essa estratégia tem se mostrado eficiente para aumentar a produtividade de água em regiões com grandes variações térmicas diárias, como o semiárido brasileiro, especialmente ao considerar as diferentes gamas e alternativas de sorventes que podem ser utilizados (LOVIS et al., 2024).

3.4.3 Dispositivos ativos e passivos

De acordo com a forma de operação, os dispositivos de sorção de água atmosférica podem ser classificados como ativos ou passivos. Os sistemas passivos funcionam utilizando apenas os recursos ambientais disponíveis, como o calor do sol ou a variação natural da temperatura ambiente, sem a necessidade de energia externa (DANIŞMAZ e ALHURMUZI, 2021). Em geral, são mais simples e baratos, o que os torna adequados para comunidades com baixo acesso à infraestrutura energética.

Brambilla et al. (2022) destacam que muitos desses sistemas utilizam materiais expostos ao ar à noite (sorção) e são aquecidos naturalmente durante o dia para liberar a água captada (dessorção). Por outro lado, os dispositivos ativos dependem de fontes externas de energia para promover o resfriamento, a regeneração do sorvente ou ambos. Nessa categoria estão os sistemas que utilizam resistências elétricas, ciclos de compressão de vapor e bombas de calor,

oferecendo maior controle sobre o processo de sorção, além de maior rendimento por ciclo (AGYEKUM et al., 2024; BEITHOU et al., 2024).

É importante destacar que, embora haja vantagens e desvantagens em cada método, há uma tendência crescente de desenvolvimento de sistemas híbridos, que combinam características dos dispositivos ativos e passivos. Por exemplo, há propostas que utilizam regeneração solar assistida por mecanismos elétricos, permitindo operação durante mais horas do dia e aumento da produção hídrica. Essa abordagem pode ter um potencial especial para regiões como o semiárido brasileiro, que apresentam alta insolação, boa amplitude térmica e dificuldade de acesso a fontes convencionais de água e energia (CENDOYA et al., 2023; AGRAWAL et al., 2023).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Revisão Sistemática e Bibliométrica

A revisão sistemática da literatura nesta pesquisa teve como objetivo compreender a relevância e o impacto das tecnologias de sorção de água atmosférica, método que tem se destacado como alternativa diante das crises hídricas. Considerando o volume expressivo de publicações sobre o tema, o foco da pesquisa foi identificar estudos que apresentassem, de forma consistente, técnicas, dispositivos e abordagens com comprovação de desempenho, por meio de ensaios experimentais e protótipos aplicados. Com isso, buscou-se analisar como se dá a aplicação dessas tecnologias sob diferentes características climáticas, visando avaliar seu potencial de enquadramento e implementação em regiões semiáridas com escassez hídrica.

A revisão sistemática consistiu na busca de termos relacionados à temática em bases de dados de amplo impacto e volume de publicações, sendo elas a *Scopus* e a *Web of Science*. Com o total de artigos encontrados, foi aplicada a metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) para auxiliar na triagem e seleção dos estudos mais relevantes. Por meio da definição de critérios de inclusão e exclusão, o protocolo PRISMA possibilitou a identificação dos trabalhos mais pertinentes à temática da pesquisa, garantindo foco e coerência na construção dos resultados.

A triagem dos artigos e a aplicação do protocolo PRISMA foram realizadas por meio da plataforma *Rayyan*, que auxiliou na organização e análise dos estudos. Cada artigo foi examinado individualmente, sendo incluído ou excluído com base na leitura dos títulos, resumos e, quando necessário, do texto completo. Após a finalização dessa etapa, foi possível chegar ao conjunto de trabalhos considerados mais pertinentes para os objetivos da pesquisa.

A partir da finalização da revisão sistemática, foi realizada uma análise bibliométrica, com o objetivo de verificar, analisar e discutir os principais aspectos presentes nos artigos selecionados. Essa análise permitiu identificar os temas mais abordados, as frequências de publicação, os autores mais produtivos e os veículos de divulgação científica mais utilizados, oferecendo uma visão ampla sobre o desenvolvimento e o estado atual da pesquisa relacionada à sorção de água atmosférica.

Essa revisão bibliométrica foi realizada a contar da obtenção e do processamento dos dados dos artigos selecionados. Os arquivos foram importados para o ambiente *RStudio*, utilizando o pacote *Bibliometrix* por meio da interface *Biblioshiny*, que permite a geração de

métricas bibliográficas e a análise temática detalhada. Com os resultados obtidos, foram elaborados gráficos descritivos e comparativos no próprio R, utilizando os pacotes *ggplot2* e *tidyverse*, os quais possibilitaram a construção de visualizações mais precisas e personalizadas. Além disso, para a análise de termos-chave e da coocorrência de palavras nos artigos foi utilizado o software *VOSviewer*, por meio do qual foi gerado um mapa temático destacando os termos mais frequentes, suas conexões e os principais focos de pesquisa relacionados à sorção de água atmosférica.

4.2 Análise sobre as tecnologias de sorção e dessorção de água atmosférica

A partir do conjunto final de artigos obtido na revisão sistemática, foram selecionados os estudos que apresentavam métodos efetivos de sorção de água atmosférica por meio das técnicas de sorção e dessorção. Com base nesses trabalhos, buscou-se analisar os parâmetros climáticos em que as tecnologias estavam ambientadas, de modo a permitir, posteriormente, um enquadramento das soluções propostas às regiões de estudo desta pesquisa.

Observou-se que a maioria dos artigos enfatiza a umidade relativa do ar como principal variável ambiental associada à eficiência dos dispositivos. Diante disso, esse parâmetro foi adotado como critério para a categorização e agrupamento das tecnologias, conforme seu desempenho em diferentes faixas de umidade. Essa etapa envolveu a tabulação e reorganização dos dados de sorção apresentados nos artigos por meio do software Excel, sendo os resultados posteriormente tratados no Rstudio, com o intuito de construir gráficos interpretativos e facilitar a visualização das relações entre eficiência e condições climáticas.

4.3 Levantamento espacial das regiões do árido e semiárido

Para a delimitação das regiões classificadas como áridas e semiáridas, foram utilizadas diferentes camadas espaciais provenientes de estudos climáticos pré-existentes, tanto em escala mundial quanto nacional. Em nível global, foi empregado um produto cartográfico desenvolvido por Beck et al. (2023), baseado em médias climáticas do período de 1991 a 2020, que classifica as regiões do mundo segundo o sistema climático de Köppen-Geiger. Já em escala nacional, foram utilizados produtos cartográficos disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), os quais oferecem uma representação mais detalhada da distribuição das regiões climáticas no Brasil.

As camadas cartográficas obtidas foram processadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS, versão 3.28. Essa plataforma permitiu a visualização, edição e análise dos dados geoespaciais, possibilitando a geração de mapas temáticos que contribuíram para uma melhor compreensão e representação espacial das regiões áridas e semiáridas no território brasileiro.

4.4 Análise dos aspectos climáticos incidentes no semiárido brasileiro

A análise dos aspectos climáticos foi de grande importância nesta pesquisa, por ser determinante para o posterior enquadramento dos diferentes tipos de sistemas de sorção de água atmosférica. Essa etapa teve como foco principal a avaliação de quatro parâmetros climáticos: precipitação, temperatura, velocidade do vento e, especialmente, a umidade relativa do ar, considerada o fator mais relevante para a temática.

Para realizar essa análise, foram coletados dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), obtidos por meio das estações meteorológicas distribuídas pelo território nacional. O INMET opera dois tipos principais de estações: convencionais e automáticas. Ambas têm como função o monitoramento e registro de variáveis meteorológicas; entretanto, neste estudo, foram utilizadas apenas as estações automáticas, por apresentarem maior abrangência e continuidade de operação desde os anos 2000, ao contrário de muitas estações convencionais que já não se encontram em funcionamento.

Na pesquisa, ao total foram utilizados os dados provenientes de 110 estações meteorológicas automáticas, localizadas na região do semiárido brasileiro, abrangendo o período de 2004 a 2023. Ressalta-se que esse intervalo corresponde a uma normal climatológica provisória, uma vez que não contempla o período de 30 anos tradicionalmente adotado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para definição de normais climatológicas. A definição do intervalo de 2004 a 2023 decorre da disponibilidade contínua e da confiabilidade dos dados das estações automáticas do INMET, cuja operação regular se intensificou a partir de meados da década de 2000. A opção por esse recorte temporal também busca refletir as tendências climáticas mais recentes e associadas ao aumento da variabilidade e à intensificação dos eventos extremos na região semiárida.

Cabe destacar que, ao longo do período analisado, foram identificadas ademais algumas estações meteorológicas automáticas que apresentaram falhas pontuais nas séries temporais, associadas principalmente a interrupções operacionais ou problemas de transmissão de dados.

Nessas situações, optou-se por excluir os registros incompletos das análises mensais e anuais, preservando apenas os dados consistentes. Tais estações que apresentaram falhas recorrentes ou longos períodos de ausência de dados foram desconsideradas previamente, de modo que o conjunto final analisado correspondeu às 110 estações automáticas que apresentaram séries temporais consistentes e adequadas para os objetivos do estudo. Esse procedimento garantiu a confiabilidade da análise climática e a coerência dos padrões observados.

Os dados meteorológicos adquiridos foram organizados e tabulados no software Microsoft Excel, sendo posteriormente processados e analisados no ambiente RStudio, onde foram geradas médias mensais e anuais com o objetivo de realizar uma análise temporal da dinâmica dos parâmetros climáticos incidentes na região de estudo. Para melhor representar e visualizar os resultados obtidos, foram elaborados gráficos e tabelas que evidenciam as variações climáticas ao longo do período analisado.

Além da análise temporal, foi realizada uma análise espacial a partir da inserção dos dados no ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS. As coordenadas geográficas das estações meteorológicas possibilitaram o georreferenciamento das informações e a aplicação do método de interpolação Inverse Distance Weighted (IDW). Embora o IDW apresente limitações relacionadas à densidade e à distribuição espacial das estações meteorológicas, podendo gerar incertezas em áreas com menor cobertura amostral, o método mostrou-se adequado aos objetivos desta dissertação, especialmente para a identificação de padrões espaciais gerais das variáveis climáticas analisadas. Trata-se de um método de caráter exploratório amplamente empregado em estudos semelhantes de espacialização climática, por permitir a estimativa de valores em áreas não monitoradas com base na influência dos pontos amostrados.

Como forma de complementar a análise climática, foi aplicado, em paralelo, o Índice de Anomalia de Chuvas (IAC), com o intuito de identificar variações positivas ou negativas ao longo da série temporal de precipitação, metodologia originalmente proposta por Rooy (1965) e posteriormente adaptada por Freitas (2004). O método baseia-se exclusivamente em dados de precipitação, permitindo a classificação dos anos como úmidos ou secos, por meio da aplicação da seguinte fórmula:

Equação 1. Índice de Anomalia de Chuva – IAC

$$\text{IAC positivo} = 3\times \left[\frac{\text{N-N1}}{\text{M-N1}}\right]$$

$$\text{IAC negativo} = -3\times \left[\frac{\text{N-N1}}{\text{X-N1}}\right]$$

Fonte: Rooy, 1965.

Em que:

N = precipitação observada do ano em que será gerado o IAC (mm);

N_1= precipitação média anual da série histórica (mm);

M = média das dez maiores precipitações anuais da série histórica (mm);

X = média das dez menores precipitações anuais da série histórica (mm).

Com a aplicação da fórmula aos dados de precipitação utilizados neste estudo, foi possível identificar os índices de anomalia de chuvas e classificá-los em diferentes níveis e frequências, de acordo com a tipologia estabelecida por Araújo et al. (2009), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Intervalos e intensidades do Índice de Anomalia de Chuvas (IAC).

Índice de anomalia de chuva (IAC)	
Intervalo do IAC	Intensidade
>4	Extremamente Úmido
2 a 4	Muito Úmido
0 a 2	Úmido
0 a -2	Seco
-2 a -4	Muito Seco
< -4	Extremamente Seco

Fonte: Adaptado de Araújo et al. (2009)

4.5 Análise sobre o Enquadramento da Tecnologia de Sorção de Água Atmosférica ao Semiárido Brasileiro

Neste tópico, buscou-se estabelecer uma inter-relação entre os aspectos climáticos observados no semiárido brasileiro e os dispositivos de sorção de água atmosférica identificados na revisão sistemática, com o objetivo de avaliar quais tecnologias apresentam maior potencial de aplicação frente às condições ambientais da região, sobretudo em função da variação da umidade relativa do ar. Essa etapa teve como propósito discutir a efetividade, as particularidades e as limitações dos sistemas analisados, relacionando suas faixas operacionais às condições climáticas locais.

Para embasar essa relação, os dados referentes aos dispositivos de sorção de água atmosférica e aos seus respectivos componentes foram tabulados e representados graficamente no ambiente RStudio. Em paralelo, os dados climáticos foram integrados por meio da elaboração de um mapa síntese das variáveis atmosféricas, com o intuito de representar espacialmente as condições predominantes no semiárido brasileiro. Esse mapa foi produzido no software QGIS a partir de uma soma ponderada entre as variáveis climáticas analisadas, utilizando como base o método de Análise Hierárquica de Processos (AHP).

A técnica AHP permite a atribuição de pesos normalizados, variando de 0 a 1, conforme o grau de importância relativa de cada variável no processo decisório. Considerando que o foco deste estudo está nos sistemas de sorção de água atmosférica, a umidade relativa do ar recebeu o maior peso na matriz de decisão (0,466), seguida pelas variáveis de precipitação (0,277), velocidade dos ventos (0,161) e temperatura do ar (0,096). A normalização dos pesos resultou em soma total igual a 1, assegurando a coerência da análise multicritério.

O resultado dessa ponderação possibilitou a geração de um mapa síntese que representa as áreas do semiárido brasileiro com maior potencial de aplicabilidade das tecnologias de sorção de água atmosférica, integrando as condições climáticas regionais ao desempenho esperado dos materiais identificados na literatura. A maior relevância atribuída à variável de umidade relativa do ar justifica-se pela relação funcional direta entre a eficiência dos dispositivos de sorção e a disponibilidade de vapor d’água atmosférico.

A hierarquização dos pesos foi obtida a partir de comparações paritárias fundamentadas em literatura especializada (PIMENTA et al., 2019; HANIKEL et al., 2021), e a consistência da matriz AHP foi verificada por meio do Índice de Consistência (CI = 0,07) e da Razão de Consistência (CR = 0,08), valores inferiores ao limite de 0,10 proposto por Saaty (1980), garantindo a coerência interna e a reprodutibilidade do modelo decisório adotado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Revisão sistemática e Análise bibliométrica

A revisão sistemática e a análise bibliométrica permitiram identificar o panorama atual das pesquisas sobre sorção de água atmosférica, destacando a evolução das publicações, os principais autores, periódicos e tendências temáticas associadas ao tema. Mediante conjunto de artigos selecionados, nos resultados a seguir, foi possível observar a consolidação gradual da área, com aumento expressivo das publicações nos últimos anos, bem como a diversificação dos materiais e abordagens tecnológicas voltadas à sorção de água atmosférica.

5.1.1 Revisão Sistemática

A revisão sistemática teve como ponto de partida a busca por publicações científicas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, utilizando a seguinte expressão booleana: ("*Atmospheric water harvesting" OR "Atmospheric water generator" OR "Atmospheric water capture"*). Como resultado, foram encontrados 1.562 artigos no total, sendo 847 na base *Scopus* e 715 na *Web of Science*.

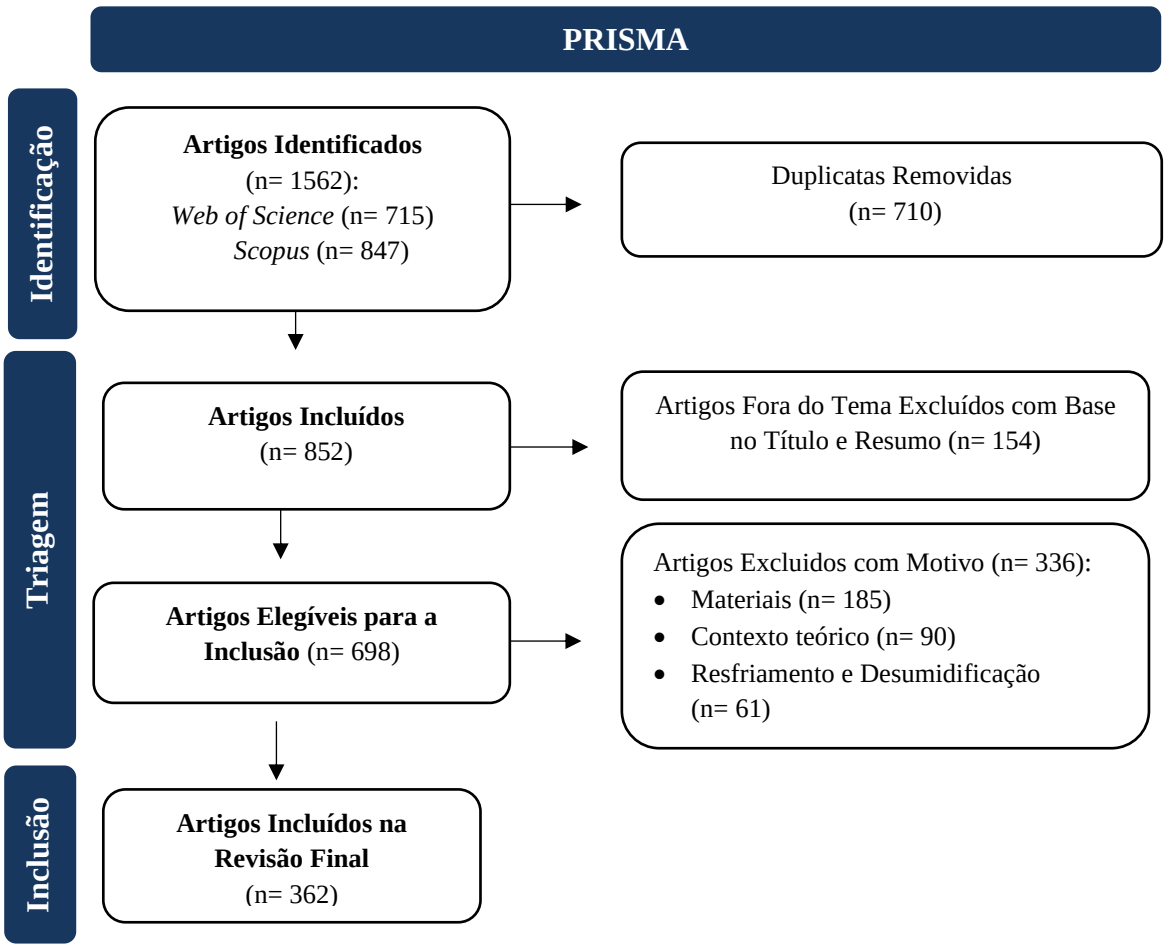
Com a aplicação do protocolo PRISMA, foram inicialmente removidas 710 duplicatas. Esse número elevado se deve ao fato de que muitos artigos estavam indexados simultaneamente nas duas bases utilizadas (*Scopus* e *Web of Science*), resultando em um volume significativo de repetições. Após a remoção das duplicatas, restaram 852 artigos, dos quais 154 foram excluídos após leitura dos resumos e análise preliminar dos textos completos, por não estarem alinhados à temática central da pesquisa. Esses artigos abordavam temas distintos, como dessalinização, irrigação agrícola, remoção de contaminantes da água, entre outros, sem tratar diretamente da sorção de água atmosférica.

Após essa etapa, restaram 698 artigos, que foram então analisados com base em três critérios de exclusão, nessa triagem final, foram eliminados 336 artigos. Dentre eles, 185 tratavam exclusivamente de materiais possivelmente aplicáveis à sorção de água atmosférica, abordando aspectos como síntese, comparações, dimensões e propriedades físico-químicas, mas sem apresentar aplicações práticas ou resultados experimentais quanto a sorção e dessorção de água. Outros 90 artigos foram excluídos por abordarem apenas a contextualização do tema, mencionando a sorção de água atmosférica como uma possível alternativa frente às crises

hídricas, porém sem demonstrar dados de implementação, testes ou eficiência. Por fim, 61 publicações tratavam da sorção de água com foco em processos de desumidificação ou resfriamento de ambientes ou equipamentos, sem ligação com o aproveitamento hídrico propriamente dito.

Ao final de todas as etapas de triagem, com base nos critérios de exclusão estabelecidos no PRISMA, obteve-se um total de 362 artigos considerados relevantes para os objetivos da pesquisa. Esses estudos representam publicações que abordam diretamente a sorção de água atmosférica com foco em métodos e técnicas de sorção e dessorção, equipamentos e dados experimentais de desempenho ou eficiência. O processo completo de exclusão e refinamento pode ser visualizado no Fluxograma PRISMA apresentado na Figura 4.

Figura 4. Fluxograma do processo de seleção dos estudos (PRISMA).



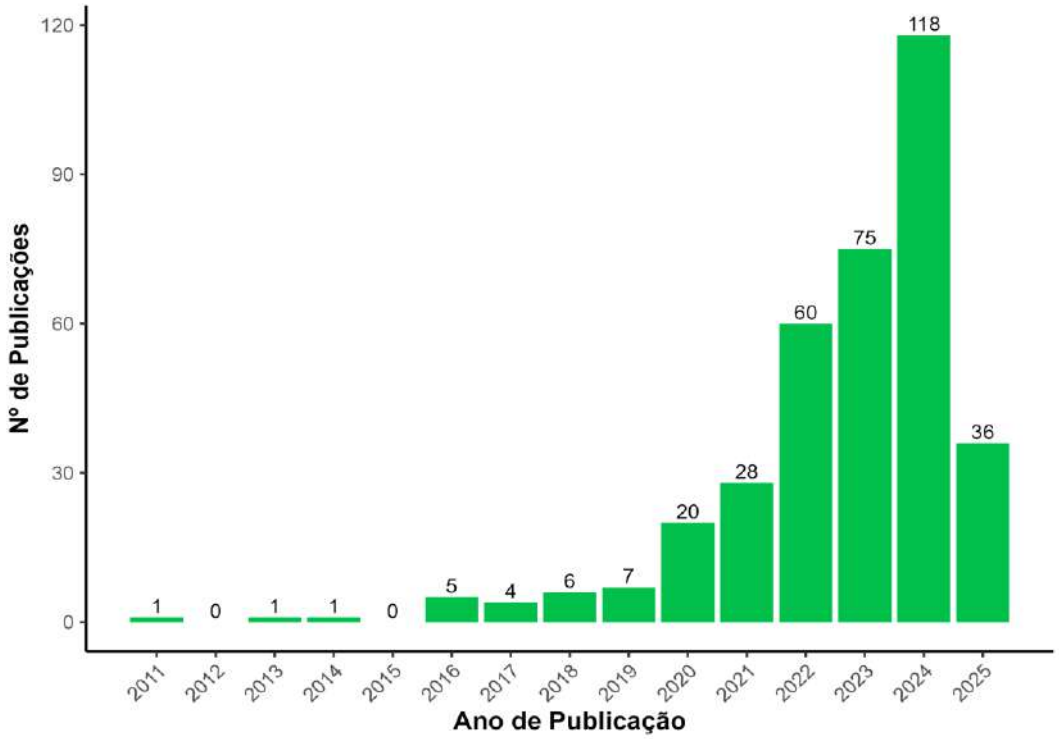
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.1.2 Análise Bibliométrica

Com base no conjunto final de publicações obtido na etapa de revisão sistemática, procedeu-se à análise bibliométrica com o propósito de examinar a distribuição temporal das produções científicas, identificar os autores mais produtivos, os periódicos de maior impacto e as principais temáticas abordadas nos estudos relacionados à sorção de água atmosférica.

A análise conduzida por meio do Bibliometrix, utilizando a interface Biblioshiny, possibilitou explorar e interpretar de forma abrangente os dados bibliográficos correspondentes aos 362 artigos selecionados, oferecendo uma visão consolidada sobre as tendências e lacunas da pesquisa nesse campo. A Figura 5 apresenta a distribuição anual das publicações sobre a temática da sorção de água atmosférica, que cobriu um período de 2011 a 2025.

Figura 5. Publicações anuais sobre a sorção de água atmosférica.



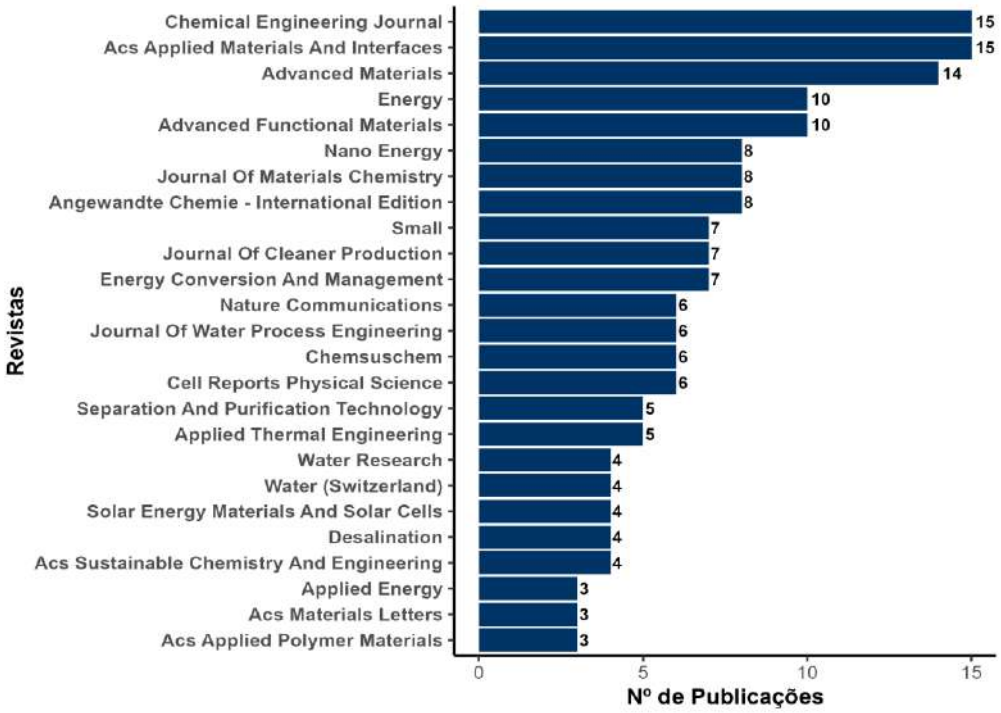
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Observa-se um crescimento contínuo do interesse acadêmico pelo tema, especialmente a partir de 2022. Entre os anos de 2022 e 2024, foram registrados mais de 60 artigos publicados por ano, com um destaque significativo para o ano de 2024, que apresentou um pico de 118

publicações. No ano de 2025, considerando apenas o primeiro trimestre, foram contabilizadas 36 publicações, o que sugere a possibilidade de um novo recorde até o final do ano.

Quanto aos meios de divulgação, a Figura 6 apresenta as principais revistas que publicaram artigos sobre a temática da sorção de água atmosférica. Observa-se que os periódicos ACS Applied Materials & Interfaces e Chemical Engineering Journal se destacam com o maior número de publicações, ambos com 15 artigos ao longo do período analisado. De modo geral, os estudos concentram-se em periódicos de alto impacto científico, voltados às áreas de materiais avançados, engenharia química, energia e recursos hídricos. Nesse contexto, destaca-se que esses periódicos apresentam fatores de impacto elevados segundo o Journal Citation Reports, situando-se, em anos recentes, em faixas superiores a 9 para o ACS Applied Materials & Interfaces e 14 para o Chemical Engineering Journal, evidenciando a elevada relevância e visibilidade científica das pesquisas publicadas.

Figura 6. Revistas com maior número de publicações sobre o tema.

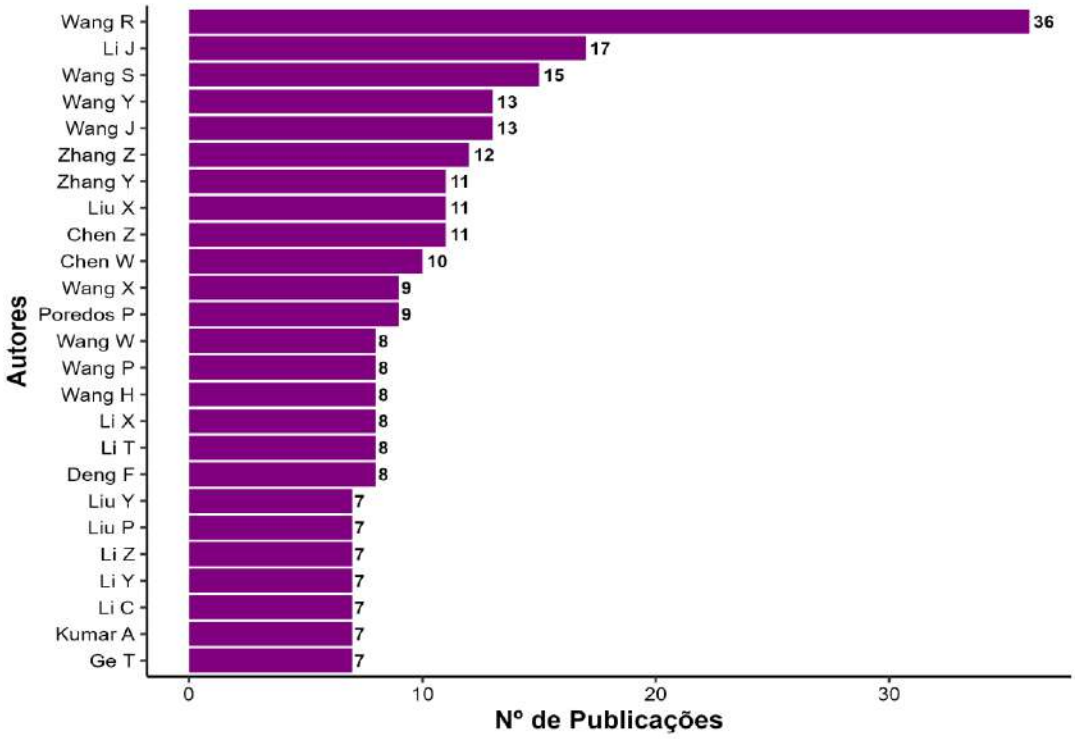


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 7 apresenta os autores com maior frequência de publicação sobre a sorção de água atmosférica. Entre eles, destacam-se autores como Li, J. e Wang, S., que já publicaram mais de 15 artigos cada e uma ênfase especial em Wang, R., que acumula cerca de 36

publicações. Observa-se que grande parte desses autores é originária do continente asiático, indicando um maior engajamento regional com a temática. Além disso, é possível notar que muitos desses pesquisadores colaboram frequentemente entre si, assinando coautorias em diversos trabalhos, o que pode explicar o elevado número de publicações conjuntas e a forte presença desses nomes na área.

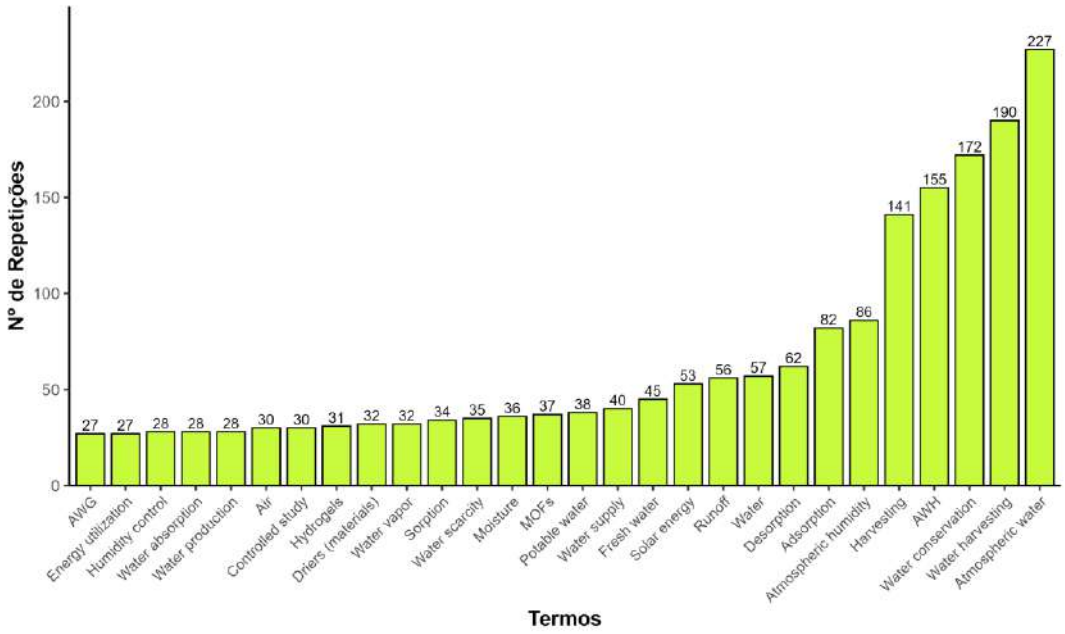
Figura 7. Autores mais produtivos sobre o tema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Ainda como parte da análise bibliométrica, a análise realizada no *VOSviewer* permitiu identificar os termos mais recorrentes no conjunto de artigos analisados. A Figura 8 apresenta os termos com maior frequência, destacando-se palavras e expressões como "*harvesting*", "*atmospheric water harvesting*", "*water conservation*" e "*water harvesting*", que aparecem em mais de 100 ocorrências cada. O termo com a maior recorrência é "*atmospheric water*", presente aproximadamente 227 vezes ao longo dos artigos analisados.

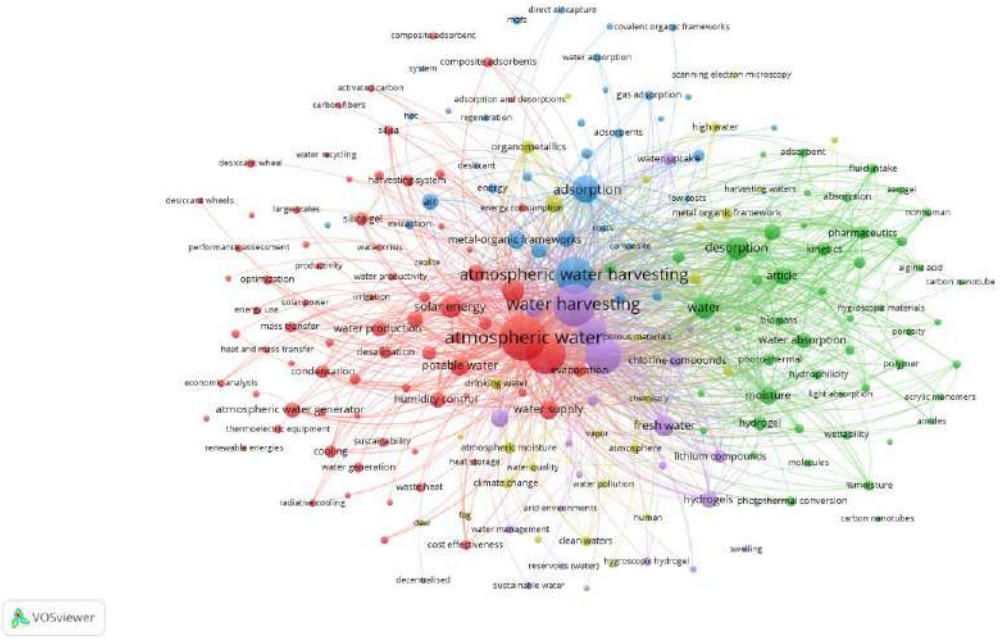
Figura 8. Termos mais recorrentes nos artigos sobre sorção de água atmosférica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O mapa apresentado na Figura 9 ilustra as palavras-chave mais recorrentes e suas inter-relações nos artigos analisados, evidenciando a formação de agrupamentos temáticos que refletem diferentes abordagens dentro do campo da sorção de água atmosférica. Observa-se a centralidade dos termos "*atmospheric water harvesting*" e "*adsorption*", que conectam os principais eixos de pesquisa, indicando a predominância de estudos voltados à adsorção de vapor de água como mecanismo de sorção. Os agrupamentos coloridos representam áreas de investigação correlatas, como o uso de materiais porosos (sílica, MOFs, hidrogéis), processos térmicos e energéticos, e temas voltados à sustentabilidade e fornecimento de água potável, revelando a natureza multidisciplinar e tecnologicamente diversificada da área.

Figura 9. Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras-chave em publicações sobre sorção de água atmosférica



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Concluindo, a revisão sistemática, aliada à análise bibliométrica, permitiu uma compreensão abrangente do estado da arte sobre a sorção de água atmosférica. A triagem criteriosa possibilitou a seleção de um conjunto relevante de publicações que evidenciam o crescente interesse e avanço na área, especialmente nos últimos anos. A análise bibliométrica revelou os principais autores, periódicos e termos-chave que norteiam as pesquisas, destacando a predominância de grupos asiáticos e periódicos de alto impacto ligados a materiais e energia. Além disso, os mapas temáticos gerados ilustram as conexões entre os tópicos abordados, fornecendo uma base sólida para futuras investigações e desenvolvimento de tecnologias eficientes na sorção de água atmosférica.

Em análise final, observa-se que, em estudos semelhantes sobre a mesma temática, como os realizados por Agyekum et al. (2024) e Brambilla et al. (2022), mesmo com a aplicação de critérios próprios de exclusão, foram selecionados menos de 100 artigos em suas revisões sistemáticas. Esse fato indica que o volume de publicações sobre o tema tem crescido de forma significativa nos últimos anos, refletindo a crescente expansão e relevância da área de pesquisa.

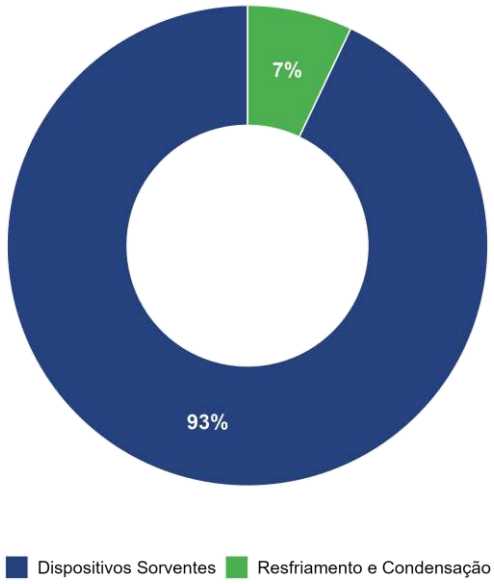
5.2 Análise dos dispositivos de sorção-dessorção de água atmosférica

A partir da revisão sistemática e da análise bibliométrica, a pesquisa identificou um conjunto de artigos que tratam diretamente de dispositivos de sorção de água atmosférica. Esse conjunto foi analisado com o objetivo de compreender quais parâmetros climatológicos são mais frequentemente considerados no desenvolvimento e aplicação dessas tecnologias. Essa análise permitiu, posteriormente, realizar o enquadramento dessas tecnologias em relação às condições climáticas predominantes na área de estudo da pesquisa: o Semiárido brasileiro. A variável climática mais recorrente apresentada nos trabalhos analisados é a umidade relativa do ar, utilizada como parâmetro essencial pelos dispositivos para a sorção de água atmosférica. Diante disso, a umidade relativa foi adotada como principal critério para o enquadramento climático nesta pesquisa.

Dos 362 artigos resultantes da revisão sistemática, foram extraídos um total de 198 métodos de sorção que abordavam diretamente a variável umidade relativa do ar, além de dados complementares importantes, como: o tipo de dessorção (ativa ou passiva), os materiais utilizados no processo (como MOFs, sílica, hidrogéis, entre outros) e a quantidade de água atingida.

Dentre os 198 estudos analisados, os autores utilizaram diferentes métodos de sorção de água atmosférica, os quais se dividem em dois grupos principais: (i) métodos baseados em resfriamento e condensação e (ii) métodos de sorção e dessorção com o uso de sorventes, que envolvem diversos materiais, como sílicas, hidrogéis, MOFs, entre outros. A Figura 10 mostra que a maioria dos estudos investigou métodos com sorventes, devido à ampla variedade de materiais disponíveis, representando 93% do total. Apenas 7% dos trabalhos abordaram técnicas baseadas em resfriamento e condensação.

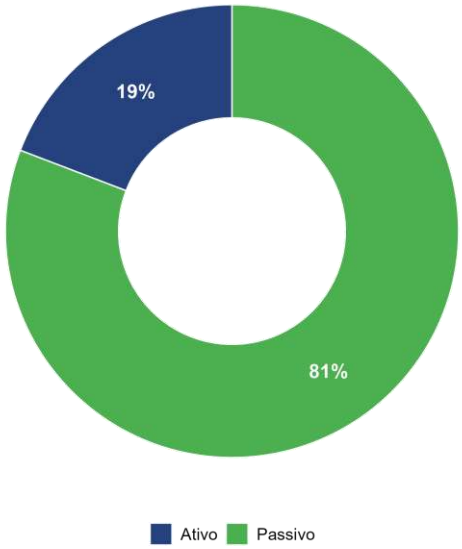
Figura 10. Distribuição percentual dos métodos de sorção de água atmosférica nos estudos analisados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Essa expressiva predominância dos métodos com sorventes nos estudos analisados também está relacionada aos mecanismos de dessorção. Enquanto os métodos de resfriamento e condensação geralmente requerem processos ativos de dessorção, os métodos com sorventes, em sua maioria, operam de forma passiva, utilizando energia solar ou até mesmo a temperatura ambiente para liberar a água captada. Essa característica torna esses sistemas mais acessíveis e economicamente viáveis, especialmente em regiões com escassez hídrica e vulnerabilidades climáticas. Quanto aos tipos de dessorção utilizados, a Figura 11 mostra que, dos 198 estudos analisados, 81% empregam métodos passivos, enquanto apenas 19% utilizam dessorção ativa.

Figura 11. Métodos de dessorção nos estudos de sorção de água atmosférica (2011 a 2025).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.2.1 Dispositivos baseados em resfriamento e condensação

Considerando os métodos de sorção de água atmosférica baseados em resfriamento e condensação, que representam uma pequena parcela dos estudos (n=12). A Tabela 2 apresenta a efetividade desses métodos de acordo com os níveis de umidade relativa do ar utilizados pelos autores. Observa-se que a maioria dos estudos opera em condições de alta umidade, geralmente acima de 60%, dentro de uma faixa que varia de 20% a 92%. A quantidade de água captada (em L h^{-1}) é bastante variável, com valores que vão de 0,0008333 a 11,75, o que reflete as diferentes metodologias adotadas em cada estudo.

Tabela 2. Desempenho dos métodos sorção por resfriamento e condensação identificados nos estudos analisados

Umidade Relativa (%)	Sorção (L h^{-1})	Autores
92	0,23	Runze et al. (2020)
84	0,00493	Casallas et al. (2024)
80	0,285	Ajiwiguna et al. (2023)
80	0,1658	Feng et al. (2024)
75	0,0296	Hassan et al. (2023)
72	0,735	Li et al. (2024)
70	0,25	Banerjee et al. (2023)
68	0,00301	Casallas et al. (2024)
66	0,0008333	Imran et al. (2025)
65	0,9583	Siyaya, Kallon e Thisani (2021)
63	0,95	Faraz Ahmad et al. (2022)
60	0,75	Mendoza-Escamilla et al. (2019)
60	11,75	Oliveros-Villanueva, Velez e Gonzalez-Quiroga (2023)
20	0,032	Feng et al. (2024)

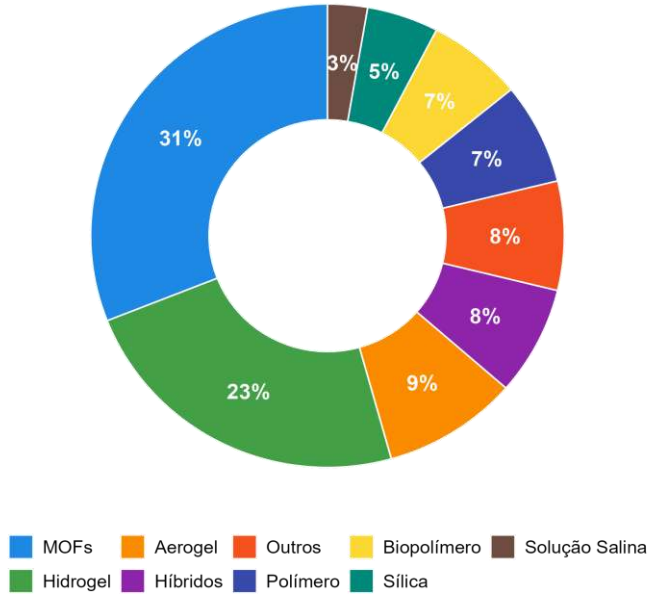
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.2.2 Dispositivos baseados em sorção com sorventes

Considerando agora os métodos baseados em sorventes, que representam a maioria dos estudos analisados (n = 184), observa-se que diferentes materiais foram empregados para a sorção de água atmosférica, conforme a distribuição percentual apresentada na Figura 12. Nota-se a predominância dos MOFs (31%), seguidos pelos hidrogéis (23%), evidenciando o destaque dessas duas classes de materiais nas pesquisas recentes. Em proporções menores aparecem os aerogéis (9%), sílica (8%), polímeros (8%), biopolímeros (7%), e os materiais híbridos (8%), que englobam combinações de diferentes compostos e tecnologias emergentes, como COFs, soluções salinas e materiais orgânicos e inorgânicos. Essa diversidade reflete a expansão das

pesquisas voltadas à otimização da eficiência de sorção e ao desenvolvimento de novas combinações de materiais com potencial de uso em regiões áridas e semiáridas.

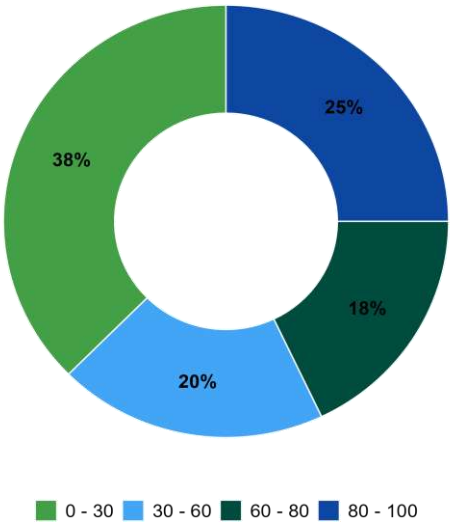
Figura 12. Distribuição percentual dos materiais sorventes utilizados nos estudos de sorção de água atmosférica.



Fontes: Elaborado pelo autor (2025)

Os dispositivos de sorção baseados em sorventes demonstram maior versatilidade em relação à faixa de umidade relativa do ar utilizada nos estudos. Enquanto os métodos por resfriamento e condensação foram majoritariamente aplicados em condições com umidade superior a 60%, os estudos com sorventes abrangem uma diversidade maior de faixas. De acordo com a Figura 13, 38% dos dispositivos foram testados sob umidade relativa entre 0% e 30%, seguidos de 20% entre 30% e 60%, 18% entre 60% e 80%, e 25% entre 80% e 100%.

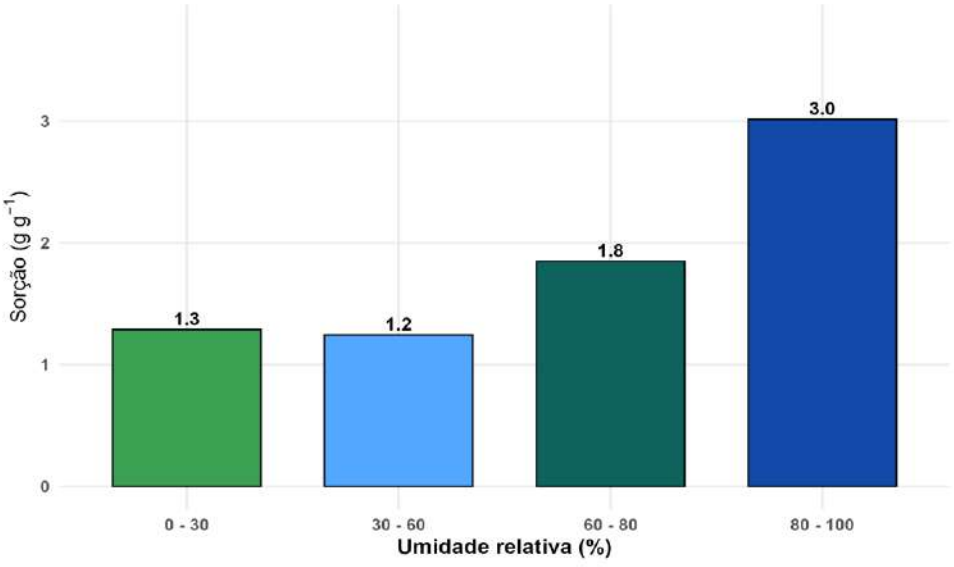
Figura 13. Distribuição percentual dos dispositivos de sorção com sorventes segundo a faixa de umidade relativa do ar utilizada nos estudos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Considerando as faixas de umidade relativa e os valores de sorção de água reportados pelos autores, foi possível calcular a média correspondente a cada intervalo. De acordo com a Figura 14, a média de sorção na faixa de 0% a 30% de umidade foi de 1,3 $g \cdot g^{-1}$, seguida por 1,2 $g \cdot g^{-1}$ na faixa de 30% a 60%, 1,8 $g \cdot g^{-1}$ entre 60% e 80%, e um valor mais elevado, de 3 $g \cdot g^{-1}$, para a faixa de 80% a 100%, o que era esperado devido à maior disponibilidade de água nessa condição.

Figura 14. Valores médios de sorção de água atmosférica por materiais sorventes, conforme as diferentes faixas de umidade relativa utilizadas nos estudos analisados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

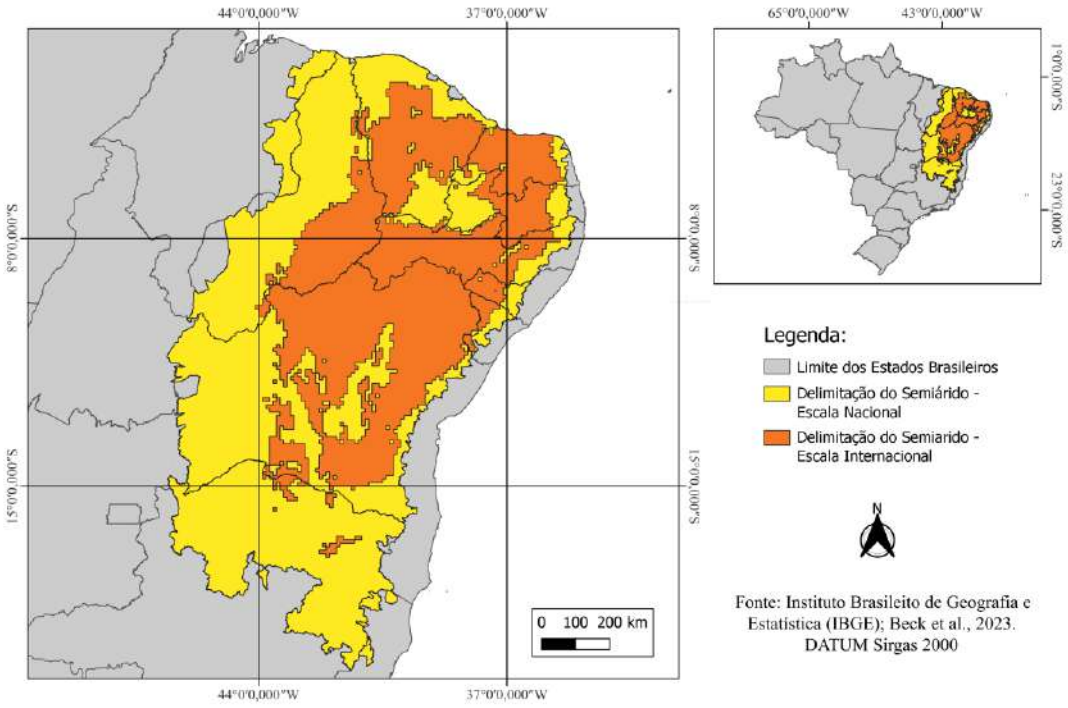
Considerando os dados apresentados sobre os diferentes dispositivos de sorção de água atmosférica, é possível concluir que os métodos baseados em sorventes se mostram mais favoráveis à temática da pesquisa. Isso se deve à maior presença de estudos voltados para condições de baixa umidade, à diversidade de materiais disponíveis e à viabilidade de utilização de métodos passivos de dessorção. Embora as maiores taxas de sorção sejam observadas em faixas com alta umidade relativa, o estudo evidenciou bons resultados também nas demais faixas, demonstrando a eficácia de diversas metodologias. Tais abordagens apresentam potencial significativo para contribuir com soluções hídricas em regiões áridas e semiáridas marcadas pela escassez de água.

5.3 Levantamento espacial de regiões do semiárido brasileiro

O levantamento das áreas classificadas como áridas e semiáridas está relacionado ao grupo climático seco definido pela classificação de Köppen. No entanto, diferentes instituições, cientistas e autores adotam delimitações variadas desses grupos, considerando distintos critérios e circunstâncias. Na Figura 15, observa-se a delimitação da região semiárida no território brasileiro. Nota-se, porém, que essa delimitação pode apresentar variações, especialmente quando se utiliza a classificação de Köppen-Geiger, elaborada em escala global.

Por ter uma abordagem mais generalista, essa classificação tende a representar uma área menor para o semiárido brasileiro, devido à menor resolução e detalhamento das informações climáticas regionais. Em contrapartida, os mapas elaborados por instituições nacionais, com base em monitoramento mais preciso das condições climáticas, geográficas e ecológicas, apresentam uma delimitação mais abrangente e ajustada à realidade ambiental e climática do país.

Figura 15. Diferentes delimitações do semiárido brasileiro em distintas escalas de análise.

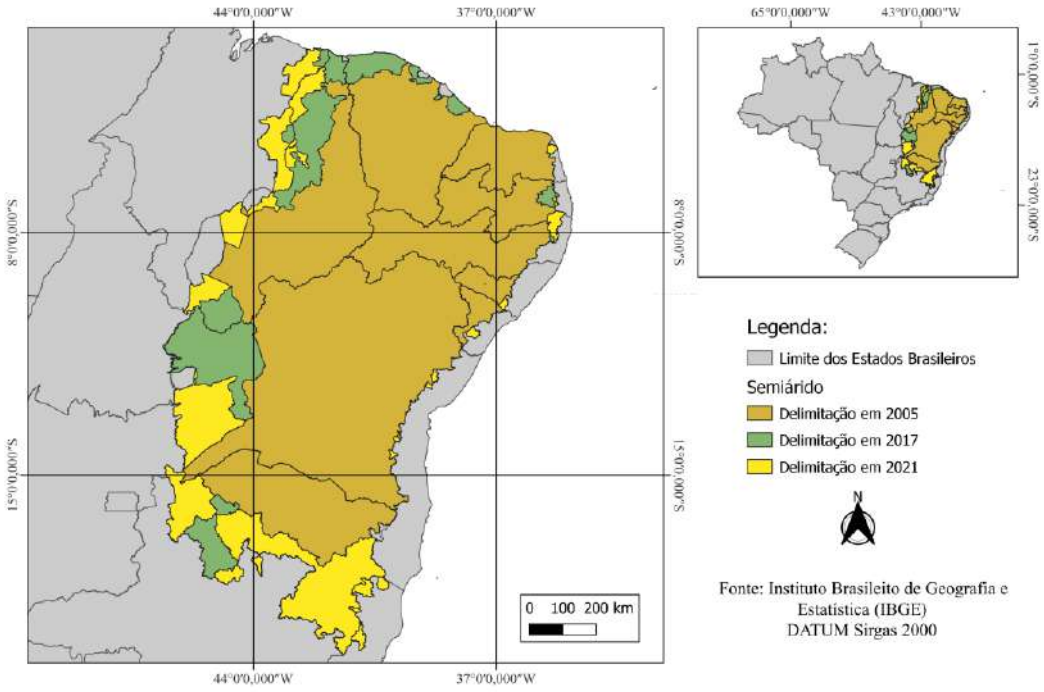


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

No território brasileiro, o órgão responsável pelo acompanhamento das condições climáticas e das delimitações regionais é o IBGE, que periodicamente realiza estudos para avaliar as características climáticas e enquadrar as diferentes regiões do país.

Na Figura 16, é possível identificar três diferentes delimitações da região semiárida brasileira. As delimitações elaboradas pelo IBGE mostram um crescimento gradativo ao longo dos anos. A região que, em 2005, já se estendia por grande parte do Nordeste e pela porção norte da Região Sudeste, teve acréscimos territoriais nas novas delimitações realizadas em 2017 e 2021. Esse avanço demonstra que, ao longo dos anos, as áreas com características de aridez e escassez hídrica têm se expandido no Brasil, o que reforça a necessidade de monitoramento contínuo e de políticas públicas voltadas para a convivência com o semiárido.

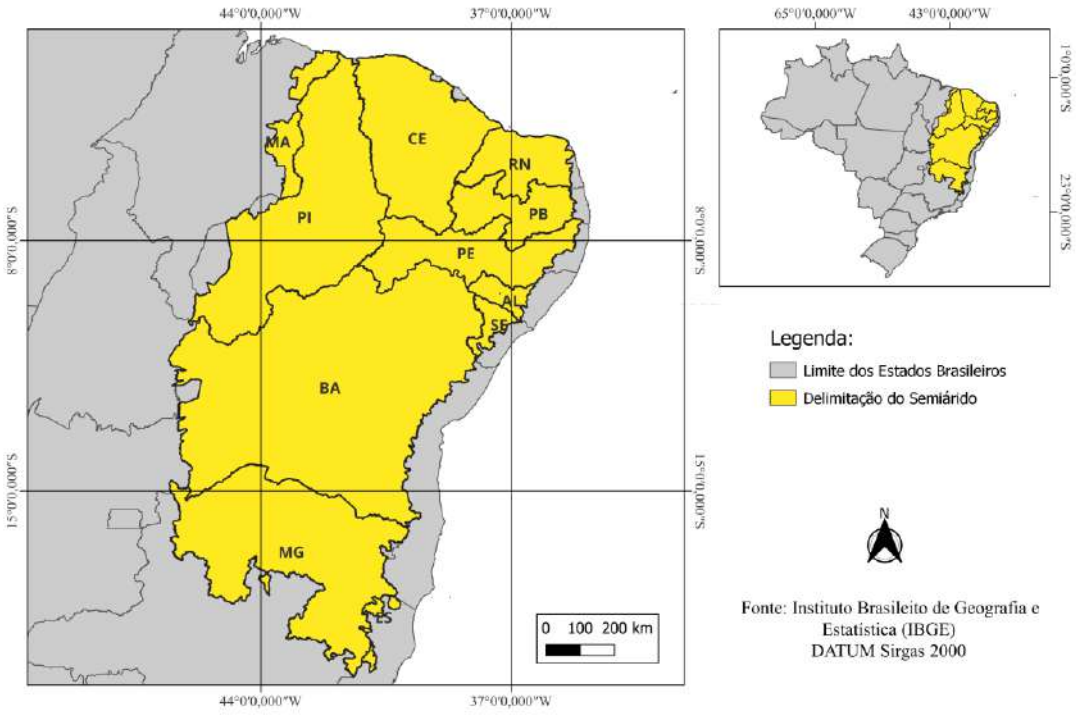
Figura 16. Expansão territorial da região semiárida brasileira segundo o IBGE.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Em síntese, observa-se que, até sua mais recente delimitação, a região semiárida já abrange uma extensa área do território brasileiro. Conforme ilustrado na Figura 17, o semiárido está presente em todos os nove estados da Região Nordeste e se estende também para a Região Sudeste, alcançando parte dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo.

Figura 17. Delimitação atual do semiárido brasileiro



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

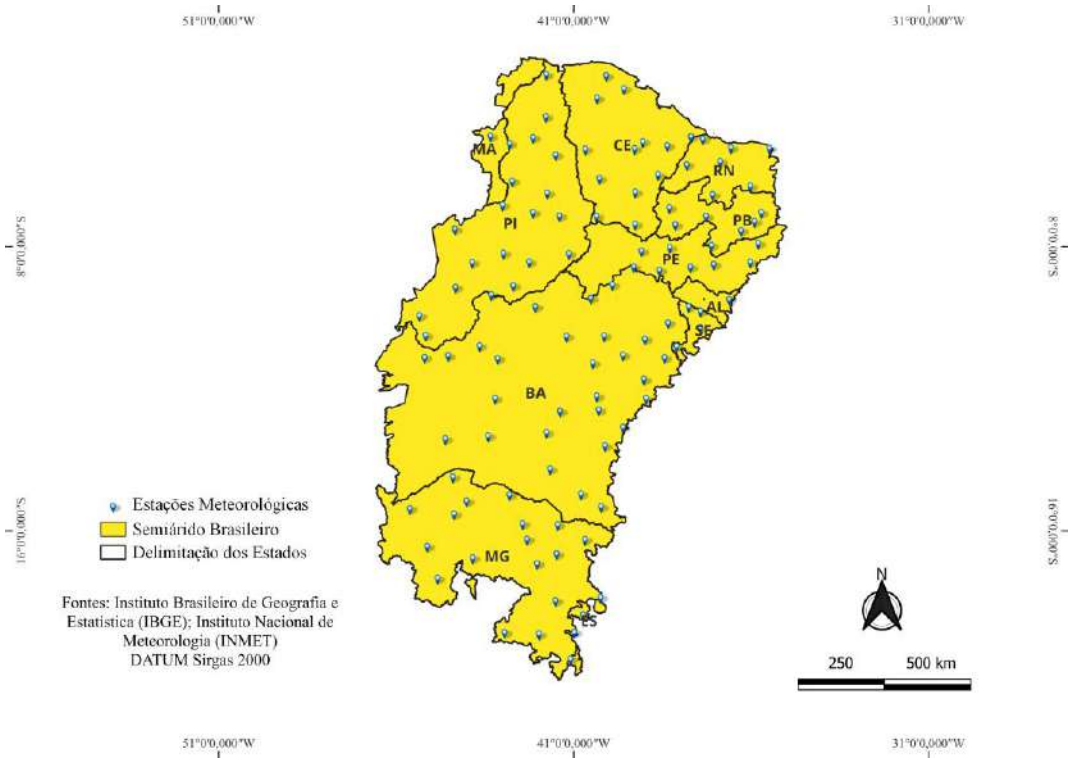
Contudo, com a progressiva expansão dessa região, é possível inferir que o fenômeno está diretamente relacionado à intensificação de fatores climáticos associados à aridez. Segundo Cunha e Braga (2022), todas as condições climáticas adversas que historicamente caracterizam o semiárido tendem a se agravar em cenários futuros de mudanças climáticas. Diante desse contexto, torna-se essencial não apenas delimitar e compreender a extensão atual do semiárido, mas também antecipar seus possíveis avanços, de modo a orientar estratégias de adaptação e mitigação frente à crescente vulnerabilidade climática da região.

5.4 Análise dos aspectos climáticos incidentes no semiárido brasileiro

Para avaliar os aspectos climáticos do semiárido brasileiro, foram utilizados dados de precipitação, umidade do ar, temperatura e velocidade de vento, obtidos a partir das médias das estações automáticas disponibilizadas pelo INMET, no período de 2004 a 2023. Esses parâmetros são essenciais para entender a dinâmica climática da região, marcada por elevada variabilidade e recorrentes eventos de escassez hídrica. No total, foram identificadas 110

estações com dados consistentes ao longo dos 20 anos analisados, conforme apresentado na Figura 18, que mostra a distribuição espacial dessas estações na área de estudo.

Figura 18. Estações meteorológicas utilizadas na análise climática do semiárido brasileiro (2004–2023).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na Tabela 3, é possível verificar a quantidade de estações meteorológicas por estado. Observa-se que Bahia, Minas Gerais e Piauí concentram o maior número de estações, todas com mais de 20 unidades, o que reflete a ampla abrangência da região semiárida nesses estados. Em contrapartida, o Espírito Santo e o Maranhão apresentam apenas uma estação cada, devido à menor extensão da área semiárida em seus territórios.

Tabela 3. Estações meteorológicas por estado na região semiárida.

Estados	Quantidade
Alagoas	2
Bahia	27
Ceará	13
Espirito Santo	1
Maranhão	1
Minas Gerais	20
Paraiba	7
Pernambuco	9
Piauí	20
Rio Grande do Norte	7
Sergipe	2

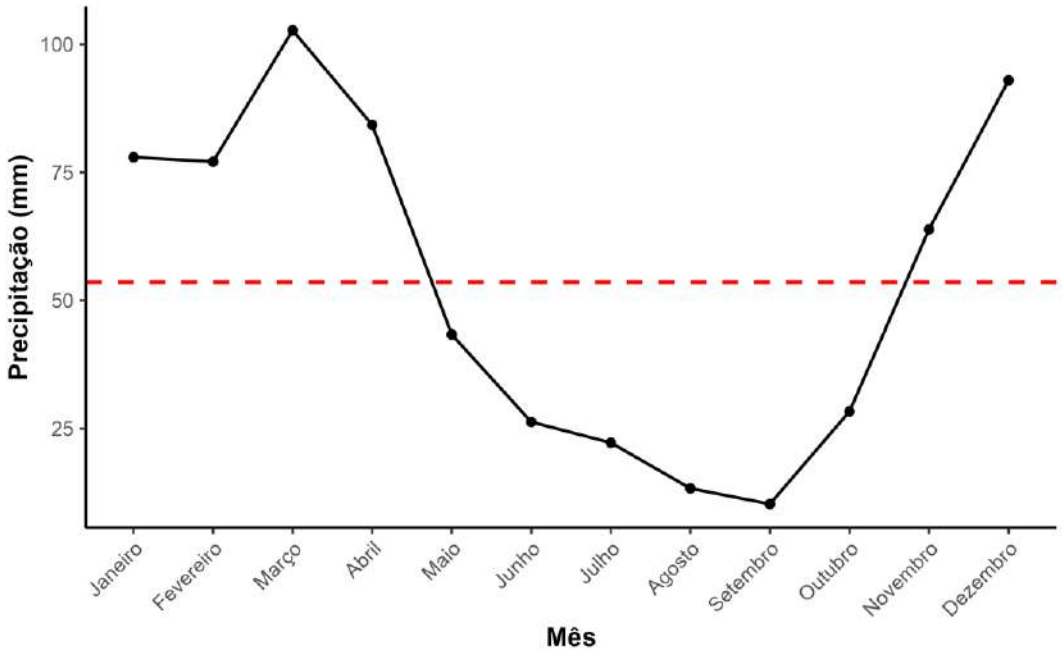
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Com as médias climáticas obtidas nas 110 estações meteorológicas analisadas foi possível calcular uma média geral representativa da região semiárida brasileira. A consolidação desses dados possibilitou a geração de médias mensais e anuais, refletindo a caracterização climática mais recente da área de estudo. Os resultados são apresentados a seguir por meio de análises espaciais e temporais, oferecendo uma visão abrangente dos padrões climáticos predominantes no Semiárido. As análises permitem identificar as localidades com maior tendência à escassez hídrica, bem como observar a evolução temporal dos principais parâmetros climáticos, reforçando a urgência na adoção de alternativas de abastecimento hídrico para a região.

5.4.1 Precipitação

De acordo com os dados levantados neste estudo, é possível observar, conforme apresentado na Figura 19, que a precipitação na região do Semiárido brasileiro apresenta seus picos mensais entre os meses de novembro e abril, com médias superiores a 60 mm, alcançando um valor máximo acima de 100 mm no mês de março. Nos demais meses, verifica-se uma acentuada redução no volume de chuvas, com os menores índices registrados nos meses de agosto e setembro, quando as médias mensais não ultrapassam os 20 mm.

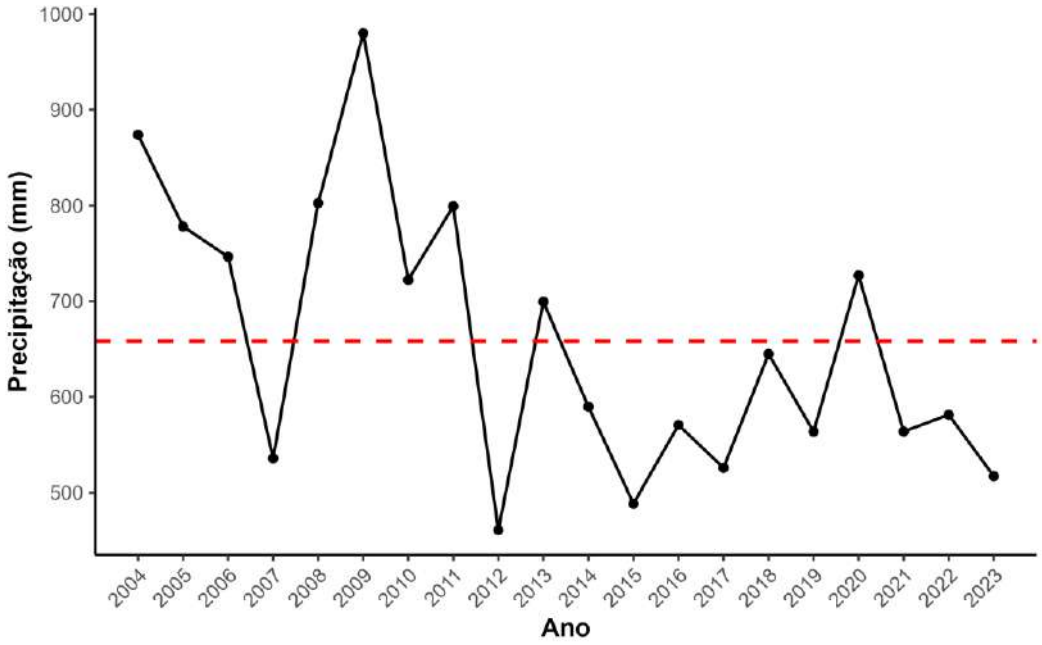
Figura 19. Precipitação média mensal no semiárido brasileiro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Anualmente, de acordo com os dados apresentados na Figura 20, é possível observar que os anos com maiores índices de precipitação foram 2004, 2009 e 2011, com médias anuais superiores a 800 mm. Por outro lado, anos como 2012 e 2015 apresentaram os menores volumes de chuva, com acumulados inferiores a 500 mm. De modo geral, a média anual de precipitação para a região, conforme os dados deste estudo, foi de aproximadamente 660 mm. No entanto, ao analisar a tendência linear apresentada na figura, nota-se que, nos últimos dez anos do período analisado, a maioria das médias anuais esteve abaixo desse valor, evidenciando uma tendência de queda na precipitação ao longo do tempo.

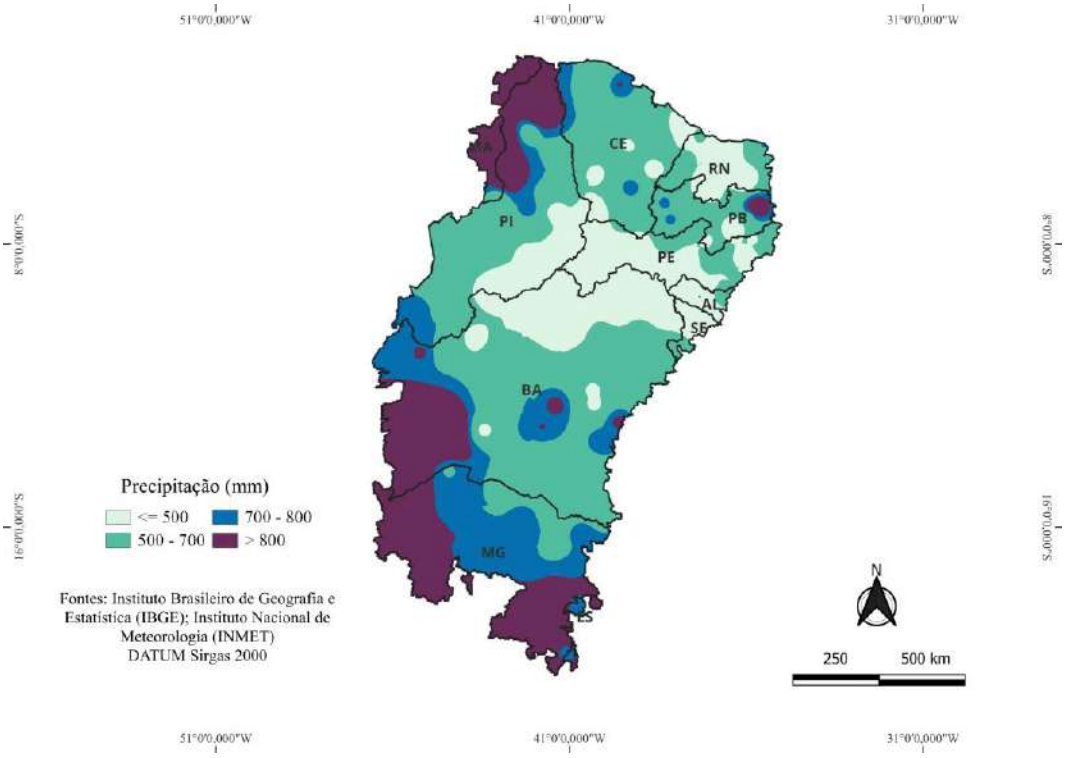
Figura 20. Precipitação média anual no semiárido brasileiro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Espacialmente, a Figura 21 demonstra as localidades da região que apresentam os menores e maiores regimes de chuva. É possível visualizar que a porção central do semiárido, bem como parte do norte, registra os menores índices anuais de precipitação, com médias inferiores a 500 mm. Em grande parte da região semiárida, as médias variam entre 500 e 700 mm. Apenas nas áreas mais próximas aos extremos da delimitação, onde há a transição com outros domínios climáticos é que se observam maiores volumes de precipitação, com valores acumulados anuais superiores a 800 mm.

Figura 21. Distribuição espacial da precipitação média no semiárido brasileiro.



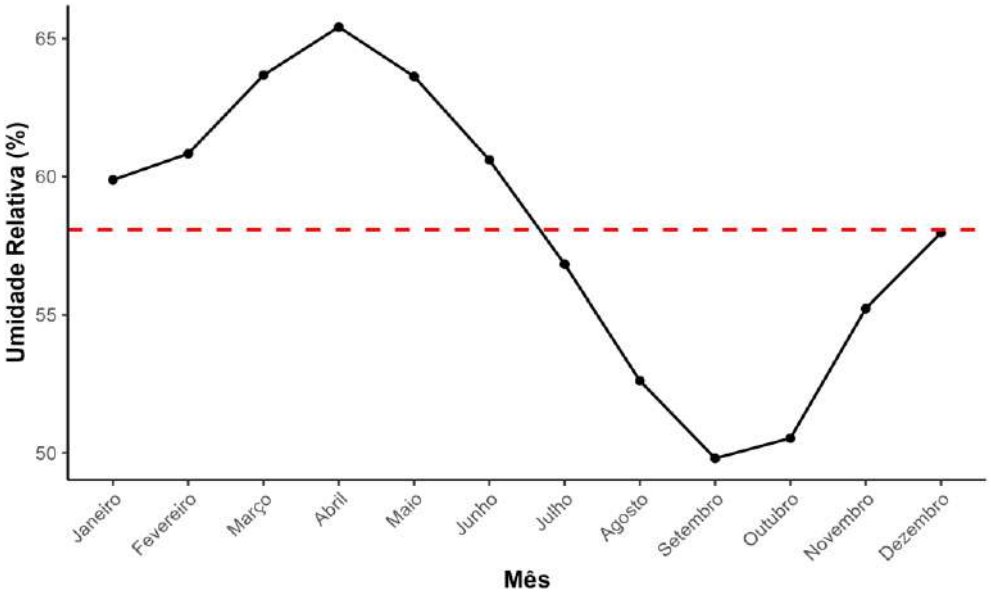
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Em resumo, ao avaliar os dados de precipitação para o semiárido, é possível concluir que, espacialmente, a maior parte da região apresenta um regime pluviométrico entre 500 e 700 mm anuais. Na análise temporal, observa-se que os meses de março e setembro representam os extremos mensais, com os maiores e menores volumes de chuva, respectivamente. Anualmente, a média de precipitação para a região é de aproximadamente 660 mm, valor que corrobora com estudos já publicados sobre o clima semiárido, como o de Moura et al. (2019), que define um regime médio anual inferior a 800 mm.

5.4.2 Umidade do Ar

Sobre os dados de umidade do ar incidentes no semiárido, os dados levantados neste estudo, apresentados na Figura 22, mostram que, mensalmente, entre os meses de janeiro a junho, a umidade relativa do ar apresenta valores próximos a 60%, atingindo um pico de cerca de 65% em abril. Nos demais meses, a média mensal é menor, destacando-se os meses de setembro e outubro, quando a umidade média fica próxima de 50%.

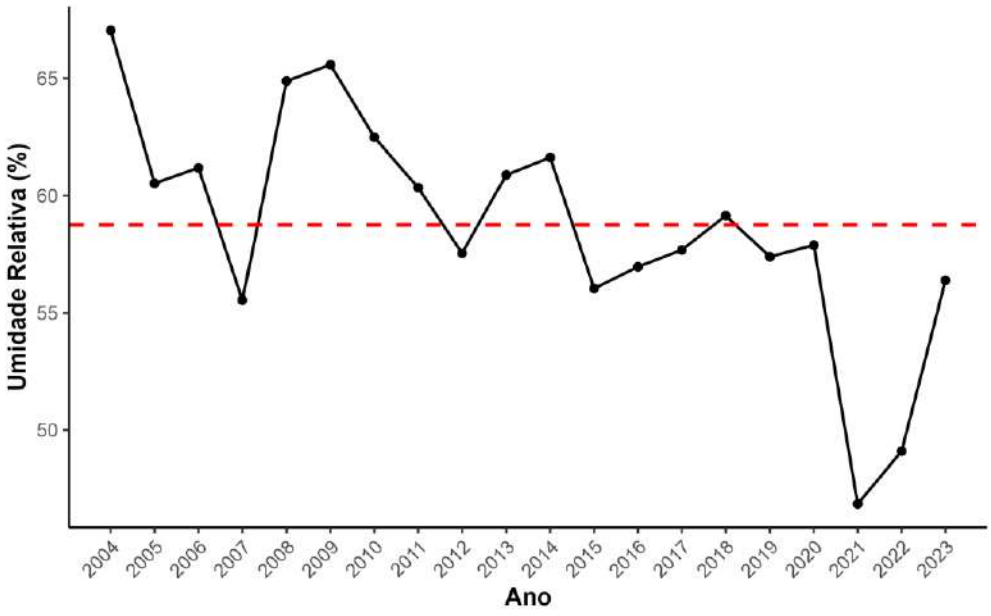
Figura 22. Umidade média mensal no semiárido brasileiro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Anualmente, conforme mostrado na Figura 23, os primeiros anos do período de estudo apresentavam índices de umidade relativa elevados, frequentemente acima de 60%, destacando-se anos como 2004, 2008 e 2009, que registraram médias superiores a 65%. Nos anos mais recentes, observa-se uma queda significativa nos índices de umidade, com 2021 e 2022 apresentando os piores valores, com médias inferiores a 50%.

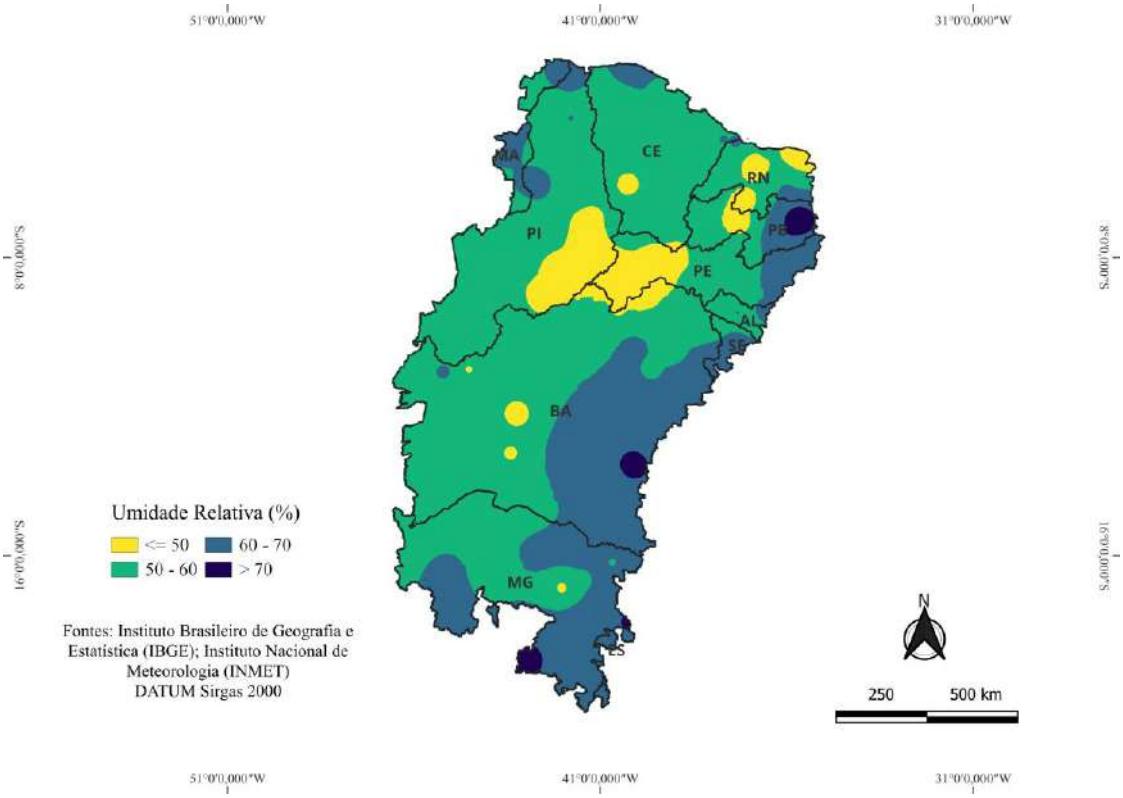
Figura 23. Umidade média anual no semiárido brasileiro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 24 mostra as localidades com as maiores e menores taxas anuais de umidade relativa no semiárido. Na área central, principalmente entre os estados do Piauí e Pernambuco, encontram-se os menores índices, com médias inferiores a 50%. Grande parte da região apresenta médias entre 50% e 60%, enquanto as áreas localizadas mais próximas às regiões costeiras do país, nos extremos da delimitação, registram os melhores índices de umidade, com médias superiores a 60%.

Figura 24. Distribuição espacial da umidade média no semiárido brasileiro.



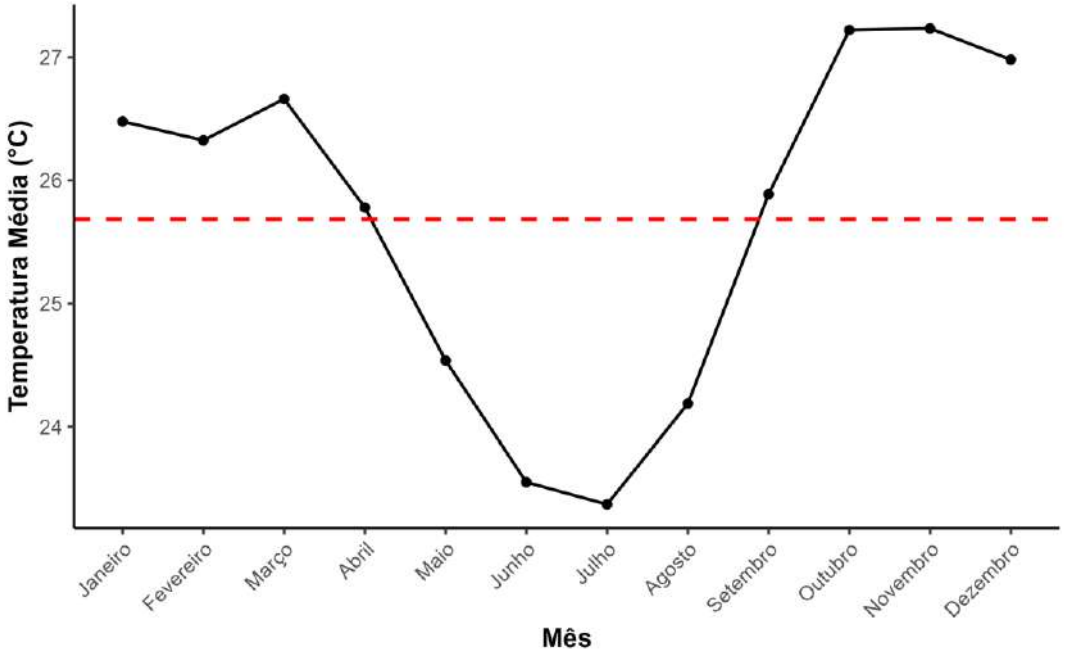
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

De modo geral, analisando os dados de umidade relativa do ar na região do semiárido, observa-se que a média anual é aproximadamente 58%, com picos máximos em abril e mínimos em setembro. Temporalmente, os dados indicam uma queda gradual desses valores médios ao longo do período estudado. Espacialmente, as menores médias de umidade concentram-se na região central, enquanto as áreas extremas e costeiras apresentam índices mais elevados. Segundo a SUDENE (2021), é comum que a umidade relativa do ar na região gire em torno de 50%. Além disso, ao comparar os dados de umidade com os de precipitação, percebe-se que ambos seguem regimes correlacionados, acompanhando padrões semelhantes.

5.4.3 Temperatura

Avaliando os dados climáticos referentes à temperatura na região do Semiárido, é possível verificar, por meio da Figura 25, que os maiores picos de temperatura média ocorrem entre os meses de outubro a março, com valores superiores a 27 °C nos meses de outubro e novembro. Nos demais meses, observam-se temperaturas mais amenas, com os menores valores registrados em junho e julho, quando as médias mensais ficam abaixo de 24 °C.

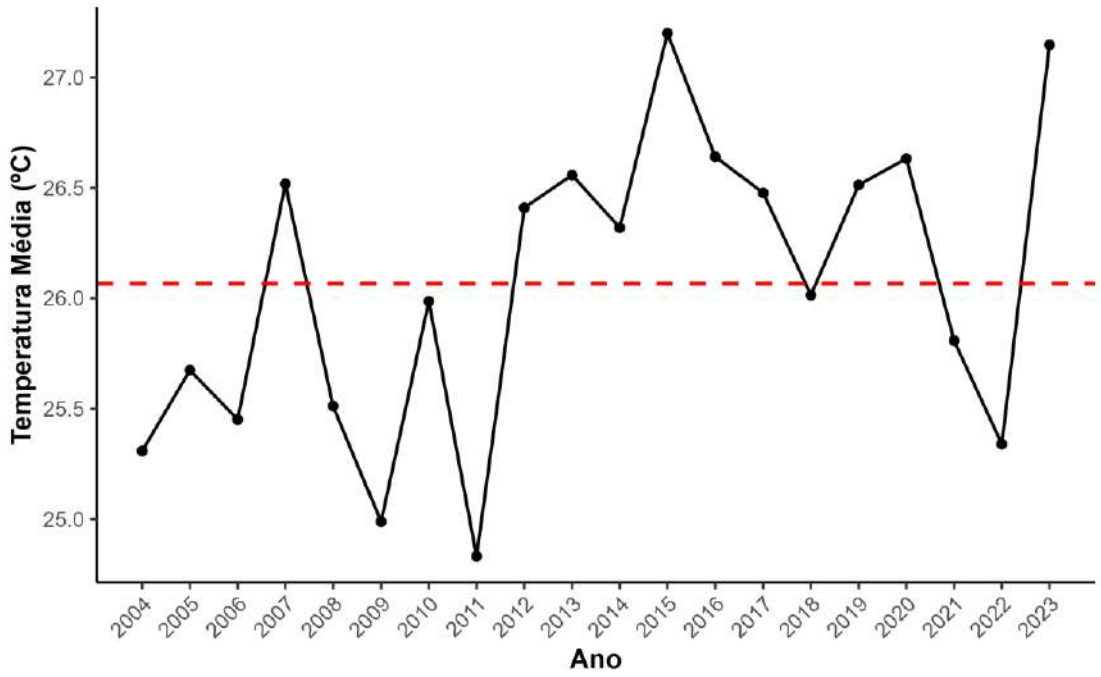
Figura 25. Temperatura média mensal no semiárido brasileiro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Anualmente, a Figura 26 demonstra que a temperatura média no Semiárido brasileiro não apresenta uma tendência linear ao longo do período analisado. Destacam-se os anos de 2015 e 2023, que registraram as maiores médias anuais, acima de 27 °C, enquanto os anos de 2009 e 2011 apresentaram as menores médias, com valores abaixo de 25 °C.

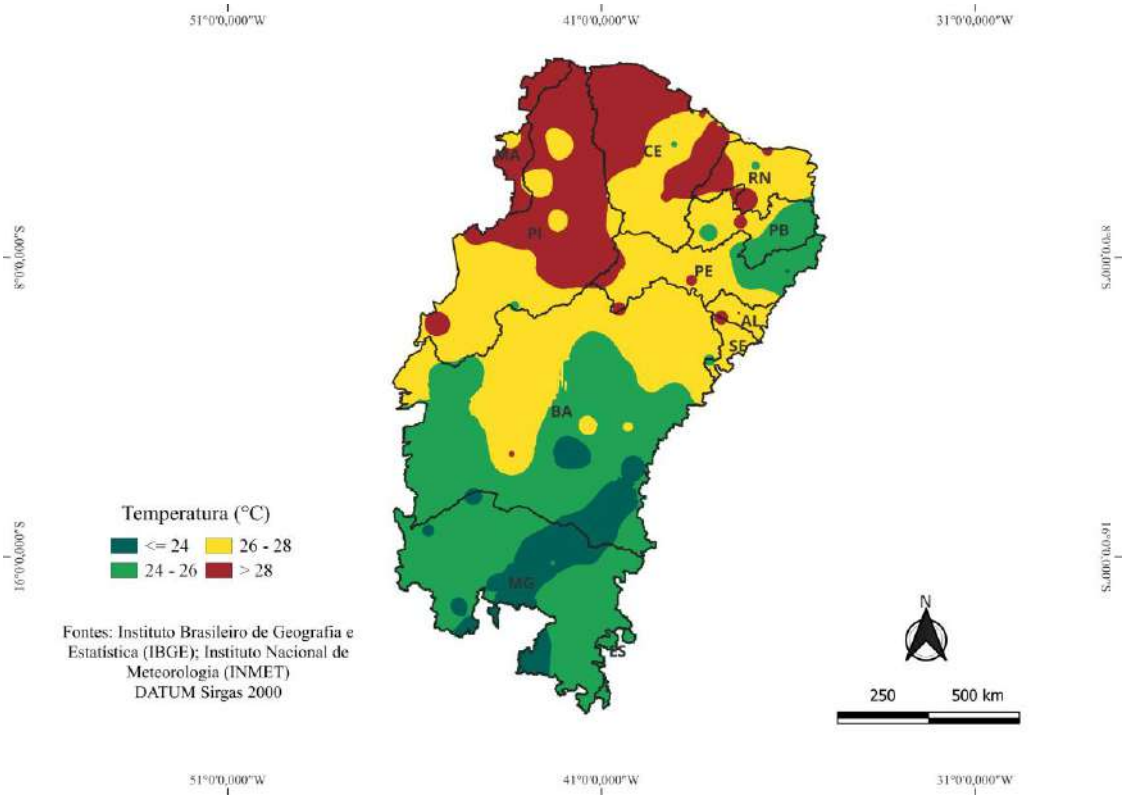
Figura 26. Temperatura média anual no semiárido brasileiro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Espacialmente, a Figura 27 permite identificar as regiões com as maiores e menores médias de temperatura no semiárido brasileiro. Observa-se que a maior parte da região apresenta temperaturas médias entre 26 °C e 28 °C, abrangendo amplas áreas dos estados da Bahia, Pernambuco e Ceará. Valores inferiores a 24 °C ocorrem de forma mais restrita, principalmente em porções elevadas e no setor sul do semiárido, abrangendo áreas de transição com Minas Gerais. Por outro lado, as maiores médias, superiores a 28 °C, concentram-se no setor norte, especialmente no Piauí, Maranhão e norte do Ceará, onde a menor latitude e a baixa altitude favorecem uma maior incidência de radiação solar ao longo do ano, resultando em um balanço térmico mais elevado. Segundo Alvares et al. (2013), esses padrões refletem o controle combinado da latitude, altitude e radiação solar incidente, fatores determinantes na distribuição espacial da temperatura em todo o Nordeste brasileiro.

Figura 27. Distribuição espacial da temperatura média no semiárido brasileiro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

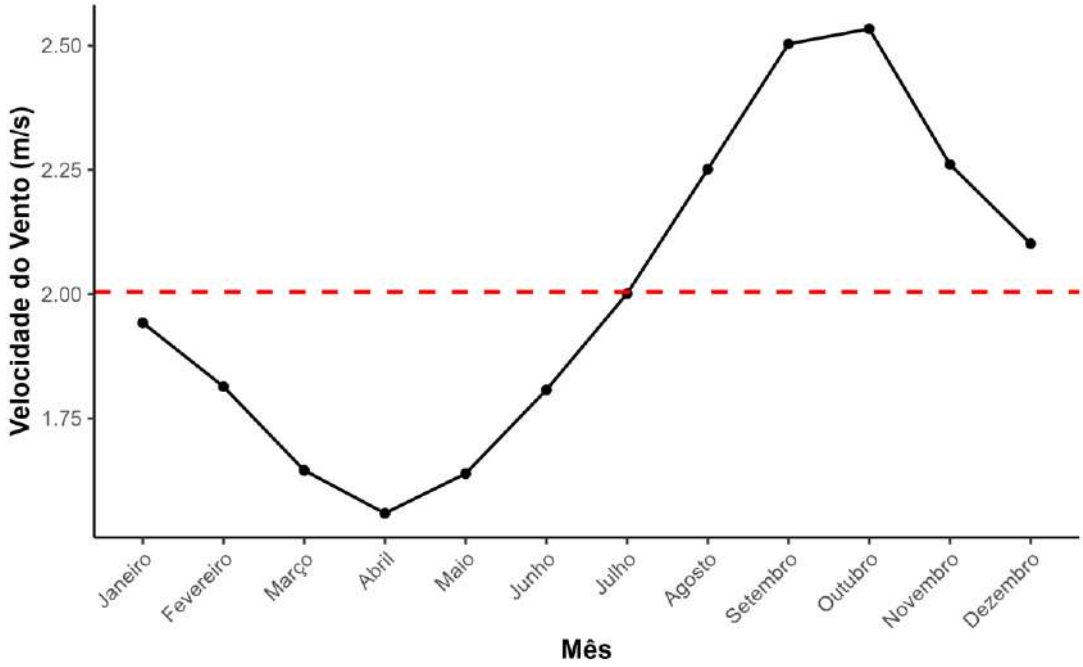
Em geral, ao avaliar os dados de temperatura para a região semiárida, observa-se que os meses de outubro e novembro são os mais quentes, enquanto junho e julho apresentam as temperaturas mais amenas, seguindo o padrão climático sazonal. Espacialmente, os valores mais elevados de temperatura concentram-se na porção norte da região, enquanto as menores médias ocorrem ao sul da delimitação. A maior parte da área estudada apresenta médias acima de 26 °C, o que está de acordo com a média anual calculada neste estudo com o valor de 26,1 °C. Esses resultados são consistentes com os dados reportados por Moura et al. (2019), que identificaram uma faixa média de temperatura entre 24 °C e 28 °C para o Semiárido brasileiro.

5.4.4 Velocidade dos Ventos

Com base nos dados de velocidade dos ventos levantados neste estudo, a Figura 28 mostra que os valores médios mensais variam entre 1,6 m s^{-1} e 2,5 m s^{-1}. Observa-se que os menores valores ocorrem entre março e maio, com destaque para abril, que apresenta a menor média (≈ 1,6 m s^{-1}). A partir de junho, há um aumento gradual na velocidade dos ventos,

atingindo os maiores registros entre agosto e outubro, com médias próximas de 2,5 m s^{-1}, seguido por uma leve redução nos meses subsequentes.

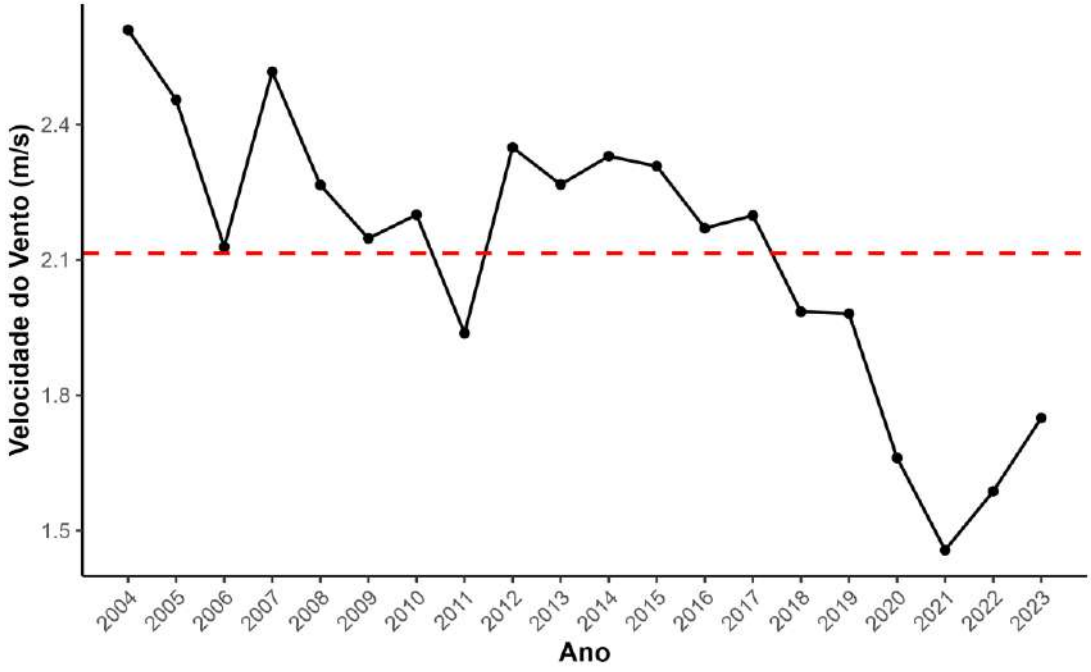
Figura 28. Média mensal da velocidade do vento no semiárido brasileiro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Anualmente, a Figura 29 mostra que os valores médios de velocidade dos ventos não apresentam linearidade ao longo dos anos analisados. Observa-se uma variação moderada entre os períodos, com médias anuais oscilando entre aproximadamente 1,5 m s^{-1} e 2,5 m s^{-1}. Os menores valores ocorreram em anos mais recentes entre os anos de 2020 e 2023, enquanto os maiores registros foram observados em 2004, 2005 e 2007, quando as médias anuais ultrapassaram 2,4 m s^{-1}.

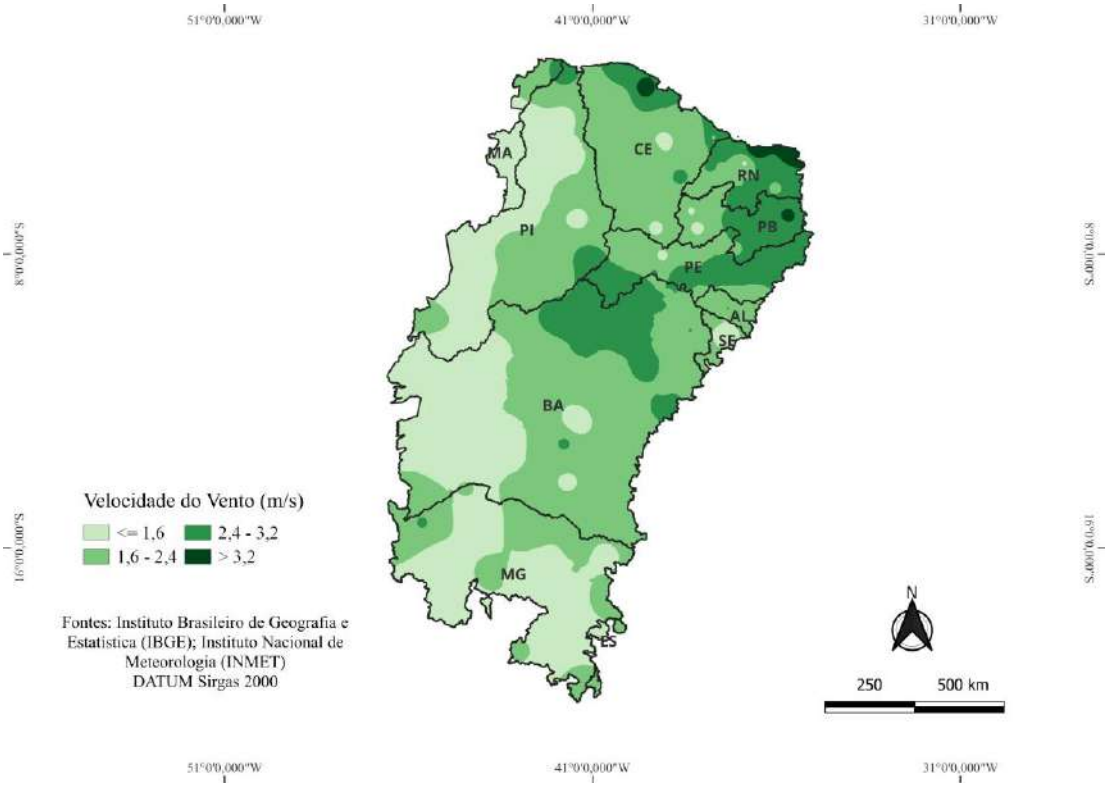
Figura 29. Média anual da velocidade do vento no semiárido brasileiro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Espacialmente, a Figura 30 mostra que a velocidade média dos ventos apresenta variação considerável ao longo do semiárido brasileiro. Observa-se que as maiores velocidades, superiores a 3,2 m s^{-1}, concentram-se principalmente nas porções norte e leste da região, abrangendo áreas do Rio Grande do Norte, Ceará, Paraíba e parte de Pernambuco, próximas à faixa litorânea e às zonas de transição costeira, onde a influência dos ventos pode ser mais intensa. A maior parte do território semiárido apresenta velocidades médias entre 2,4 m s^{-1} e 3,2 m s^{-1}, enquanto as menores velocidades, inferiores a 1,6 m/s, ocorrem de forma pontual no sudoeste da Bahia e norte de Minas Gerais.

Figura 30. Distribuição espacial da velocidade do vento no semiárido brasileiro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

De modo geral, ao avaliar os dados de velocidade dos ventos levantados neste estudo, observa-se que o mês de maio apresenta os menores valores médios, enquanto o período entre agosto e outubro registra os maiores picos. Anualmente, não há uma tendência linear clara, com variações moderadas ao longo dos anos, embora a velocidade média anual dos ventos para a região seja de aproximadamente 2,2 m s^{-1}. Espacialmente, a variação também é pouco expressiva, com grande parte da área do semiárido apresentando valores dentro de uma mesma faixa média, exceto em algumas localidades, especialmente nas proximidades do litoral, onde os ventos tendem a ser mais intensos.

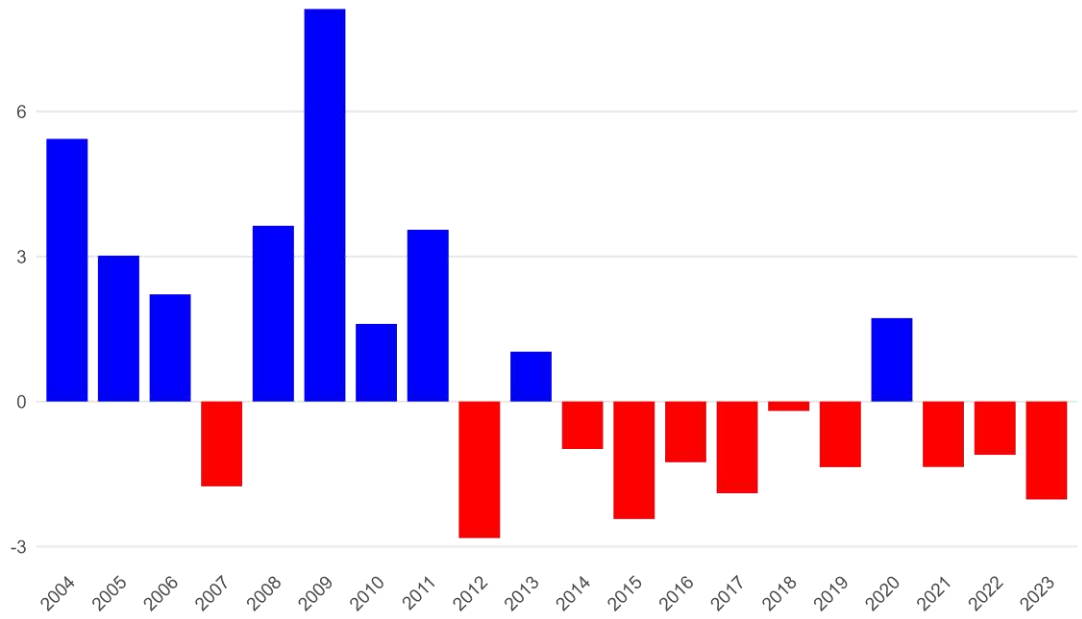
5.4.5 Índice de Anomalias de Chuva

Para complementar os dados climáticos apresentados até então, com foco na análise da série temporal, aplicou-se neste estudo o Índice de Anomalia de Chuvas (IAC), com o objetivo de identificar a ocorrência e a frequência de eventos de seca na região do Semiárido ao longo dos anos.

Como resultado, pode-se observar, por meio da Figura 31, a ocorrência de valores positivos e negativos calculados a partir das variações climáticas. Os valores positivos indicam anos de cheia, com acumulados de precipitação acima da média para a região. Já os valores negativos correspondem a anos de seca, nos quais os volumes de chuva ficaram abaixo do padrão climático esperado.

É possível notar que, entre 2004 e 2013, ocorreram predominantemente anomalias positivas nos acumulados de precipitação na região, com exceção dos anos de 2007 e 2012. Já nos anos mais recentes, observa-se uma predominância de anomalias negativas, indicando a ocorrência mais frequente de secas. Considerando a variação dos dados ao longo do período analisado, é possível afirmar que há uma tendência crescente de eventos de seca na área de estudo. Esse padrão é um sinal de alerta, pois pode intensificar a escassez hídrica na região nos próximos anos.

Figura 31. Índice de Anomalia de Chuva no Semiárido



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Quanto à intensidade dessas anomalias, a Tabela 4 apresenta os valores classificados conforme o Índice de Anomalia de Chuvas (IAC), variando entre as categorias de “extremamente úmido” a “muito seco”. Analisando os anos de maior variação, observa-se que 2004 e 2009 foram os anos com os maiores índices de excesso de chuva, classificados como “extremamente úmidos”. Em contraposição, anos como 2012 e 2015 foram identificados como

os mais críticos em termos de escassez hídrica, sendo classificados como “muito secos”, o que indica uma queda significativa nos índices de precipitação.

Tabela 4. Intensidade dos Índices de Anomalias de Chuva no semiárido

Ano	IAC	Intensidade	Ano	IAC	Intensidade
2004	5,4	Extremamente Úmido	2014	-1,0	Seco
2005	3,0	Muito Úmido	2015	-2,4	Muito Seco
2006	2,2	Muito Úmido	2016	-1,3	Seco
2007	-1,8	Seco	2017	-1,9	Seco
2008	3,6	Muito Úmido	2018	-0,2	Seco
2009	8,1	Extremamente Úmido	2019	-1,4	Seco
2010	1,6	Úmido	2020	1,7	Úmido
2011	3,6	Muito Úmido	2021	-1,4	Seco
2012	-2,8	Muito Seco	2022	-1,1	Seco
2013	1,0	Úmido	2023	-2,0	Seco

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Ao comparar esses resultados com os registros do INPE sobre a ocorrência dos fenômenos *El Niño* e *La Niña*, observa-se que nem sempre há correspondência direta entre os anos de ocorrência desses eventos e as anomalias de chuva observadas no semiárido. Por exemplo, durante os episódios de *El Niño* (2006–2007, 2009–2010 e 2015–2016), apenas 2007 2015 e 2016 apresentaram comportamento marcadamente seco, enquanto 2009, mesmo sendo ano de *El Niño*, registrou condições extremamente úmidas.

De forma semelhante, anos associados à *La Niña* (2007–2008, 2010–2011 e 2017–2018) apresentaram respostas distintas: enquanto 2008, 2010 e 2011 foram úmidos, 2007, 2017 e 2018 mantiveram índices negativos de precipitação. Essas discrepâncias sugerem que os efeitos dos ENOS sobre o semiárido brasileiro são modulados possivelmente por condições locais e regionais, reforçando a importância de um monitoramento climático contínuo e aprofundado (INPE, 2025).

Quando aos dados de anomalia, ainda se observa que, no período analisado por esta pesquisa, especialmente nos últimos 10 anos, houve predominância de anomalias negativas, indicando uma maior frequência de eventos de seca. Essa tendência pode representar um agravamento do estresse hídrico na região. É importante destacar que, historicamente, o

Semiárido brasileiro vivencia, em ciclos, episódios de secas severas. Cunha (2022), em seu estudo sobre mudanças climáticas, descreve que entre 1950 e 2020 foram registrados diversos períodos críticos, sendo o intervalo de 2011 a 2016 um dos mais intensos e recentes. Essa informação corrobora os dados apresentados neste estudo, especialmente em relação aos anos de 2012 e 2015, que se destacaram como os mais secos do período analisado. Porém, mesmo após essa grande seca, os anos subsequentes continuaram apresentando anomalias negativas, indicando a persistência de condições desfavoráveis de precipitação na região.

Essa condição climática observada na região afeta profundamente todo o ecossistema do Semiárido, impactando tanto o meio ambiente quanto, principalmente, a população que ali vive. Além da escassez hídrica marcante enfrentada pelas comunidades locais, esses fatores climáticos adversos comprometem o desenvolvimento agrícola regional e geram sérias dificuldades socioeconômicas. Os efeitos são mais severos entre os pequenos agricultores que dependem da agricultura familiar, bem como nas atividades de pesca, ambas diretamente influenciadas pelas variações e anomalias climáticas (YOUNG, COSTA e FARES, 2019).

Silva et al. (2023) afirmam que esses padrões de seca tendem a continuar e se intensificar ao longo dos anos, o que contribui diretamente para o aumento do índice de aridez da região, podendo atingir níveis críticos de susceptibilidade à desertificação climática. Esses fatores agravam ainda mais a necessidade de se buscar alternativas que garantam a sobrevivência nas áreas mais afetadas, exigindo a elaboração de estratégias eficazes, especialmente no que diz respeito ao acesso à água, um recurso essencial para a vida.

5.5 Avaliação da Adequação da Tecnologia de Sorção de Água Atmosférica às Condições Climáticas do Semiárido Brasileiro

Considerando os aspectos climatológicos discutidos anteriormente, que caracterizam a região de estudo inserida no Semiárido Brasileiro, este tópico tem como propósito analisar a adequação das tecnologias de sorção de água atmosférica às condições ambientais locais. Busca-se, portanto, identificar, entre os dispositivos já levantados neste estudo, aqueles mais favoráveis à inserção na região, avaliando sua eficiência e potencial de aplicação frente às condições climáticas predominantes.

5.5.1 Condições Climáticas do Semiárido Brasileiro e Potencial para a Sorção Atmosférica

Avaliando as condições climáticas identificadas no Semiárido Brasileiro, é possível compreender as características predominantes da região e, consequentemente, as condições às quais as tecnologias de sorção de água atmosférica estarão submetidas. Quanto aos parâmetros climáticos, o principal fator de análise, tanto sob a ótica climatológica quanto tecnológica, é a umidade relativa do ar, amplamente citada nos artigos analisados como a variável mais determinante, em muitos casos, a única condicionante direta. No entanto, observa-se que outros elementos, como temperatura, velocidade dos ventos e precipitação, também se relacionam, de maneira indireta, com a disponibilidade de vapor d'água na atmosfera, influenciando, em algum grau, o desempenho dos dispositivos de sorção (DANIŞMAZ e ALHURMUZI, 2021; TU e HWANG, 2020).

Ao se avaliar a umidade relativa do ar no Semiárido Brasileiro, os estudos climatológicos indicam que a média anual dessa variável é de aproximadamente 58%, podendo variar conforme o mês ou as condições climáticas de cada ano. Essa oscilação normalmente ocorre entre 45% e 65%, com extremos observados em situações de estiagem severa ou de precipitação intensa. Esses valores de umidade média estão diretamente relacionados às condições de operação dos dispositivos de sorção, determinando, portanto, quais tipos de materiais e sistemas apresentam maior potencial de aplicação na região (TASHTOUSH e ALSHOUBAKI, 2023).

A faixa de umidade relativa observada na região não corresponde às condições mais favoráveis para a sorção de água atmosférica, como aquelas registradas em áreas de maior altitude ou sob climas mais úmidos, onde os índices podem ultrapassar 80% e, consequentemente, favorecer uma maior eficiência dos processos de captação (TAO et al., 2023). Entretanto, essas condições também não se equiparam aos cenários mais restritivos encontrados em regiões predominantemente áridas, nas quais a umidade relativa pode permanecer abaixo de 30%, limitando de forma significativa o desempenho dos sistemas de sorção.

Olhando para os estudos recentes, observa-se que a maior parte dos dispositivos e materiais voltados à sorção atmosférica foi desenvolvida para conseguir operar de forma estável em faixas médias de umidade, geralmente entre 40% e 70%, com alguns apresentando bom desempenho mesmo em índices menores e uma eficiência ainda maior quando a umidade se eleva (DANIŞMAZ e ALHURMUZI, 2021; TU e HWANG, 2020). Dessa forma, as condições

encontradas no Semiárido Brasileiro não as impedem de serem compatíveis com o funcionamento esperado dessas tecnologias, o que reforça seu potencial de aplicação na região.

Quanto à precipitação, os estudos geralmente não mencionam essa variável como um fator direto na sorção de água atmosférica. No entanto, ela está intimamente relacionada à umidade do ar disponível na atmosfera, uma vez que os valores de umidade tendem a acompanhar os de precipitação: nos dias mais chuvosos, a umidade aumenta; já nos períodos mais secos, ela diminui (PINHEIRO e AMORIM, 2007). Essa relação pode influenciar o desempenho das tecnologias de sorção. Assim, essa variável também se mostra importante de ser analisada principalmente em um contexto espaço-analítico, pois áreas do Semiárido com maior ocorrência de chuvas tendem a apresentar maior disponibilidade de umidade atmosférica, enquanto regiões com menor índice pluviométrico possuem menor valor tal variável, como se observa ao comparar as áreas limítrofes da região semiárida, geralmente mais úmidas, com as áreas centrais, que apresentam condições mais secas.

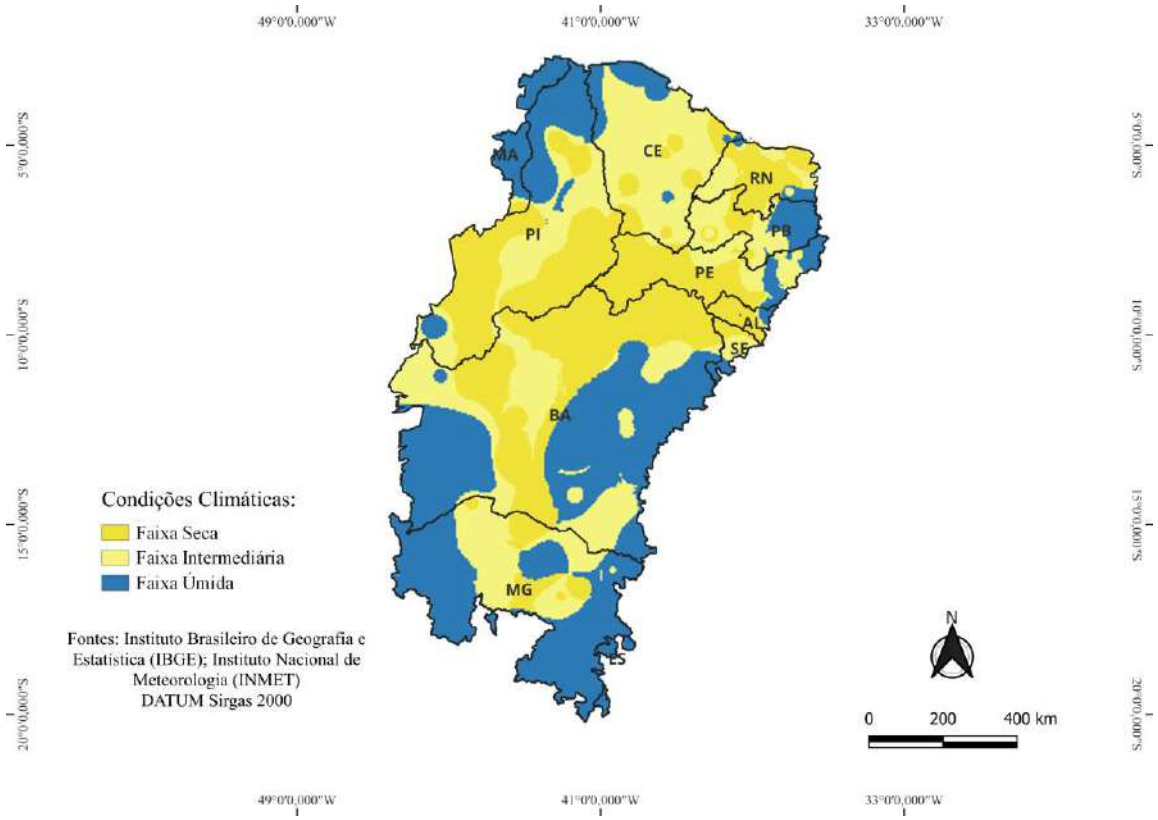
Nos estudos analisados, a velocidade dos ventos, outra variável analisada, não é frequentemente mencionada como um parâmetro diretamente relacionado à eficiência da sorção de água atmosférica. No entanto, o levantamento de seus dados se mostra relevante, pois esse fator pode influenciar a variabilidade da umidade atmosférica em determinados locais, contribuindo em maior ou menor grau, dependendo do tipo de método de sorção empregado (MARENGO et al., 2011). Em situações em que há formação de neblina ou aumento do fluxo de ar úmido, o vento pode favorecer a renovação do ar e o transporte de vapor d'água, ampliando a disponibilidade para sorção. Trata-se, portanto, de um aspecto que merece ser considerado nas análises locais, ainda que, na área de estudo, não tenham sido observadas grandes variações na velocidade dos ventos, exceto em regiões mais costeiras, onde a intensidade tende a ser mais elevada.

Sobre a temperatura, embora mantenha uma relação mais íntima com a variação e a dinâmica da umidade relativa do ar, apresenta menor variabilidade média ao longo do ano na região semiárida, sendo observadas diferenças mais expressivas apenas em termos espaciais. Apesar disso, é uma das variáveis mais citadas nos estudos sobre sorção atmosférica, logo após a umidade, pois nos dispositivos passivos ela é frequentemente utilizada como método direto de dessorção da água retida pelos materiais sorventes (BEITHOU et al., 2024). Assim, essa variável climática se torna de grande importância na aplicação e no planejamento da tecnologia, especialmente considerando que os valores de temperatura observados no Semiárido Brasileiro são elevados durante a maior parte do ano, o que pode favorecer os processos de dessorção e, consequentemente, aumentar a eficiência dos dispositivos.

Já analisando os dados climáticos de forma integrada, a Figura 32 apresenta o mapa síntese das condições climáticas do semiárido brasileiro, elaborado a partir da ponderação das variáveis consideradas relevantes para a aplicação dos métodos de sorção de água atmosférica. O mapa evidencia, em termos espaciais, diferentes classes relativas de favorabilidade climática, categorizadas como áreas com condições mais úmidas, intermediárias e mais secas, resultantes da padronização e da soma ponderada das variáveis analisadas.

Considerando que os dispositivos de sorção tendem a apresentar melhor desempenho em ambientes com maior disponibilidade de umidade atmosférica, observa-se que as áreas com maior potencial de aplicação dessas tecnologias concentram-se, predominantemente, nas porções limítrofes do Semiárido. Essas regiões correspondem a zonas de transição climática e a faixas mais próximas ao litoral, onde há maior influência de massas de ar úmidas e índices pluviométricos relativamente mais elevados.

Figura 32. Integração espacial das variáveis climáticas no Semiárido Brasileiro

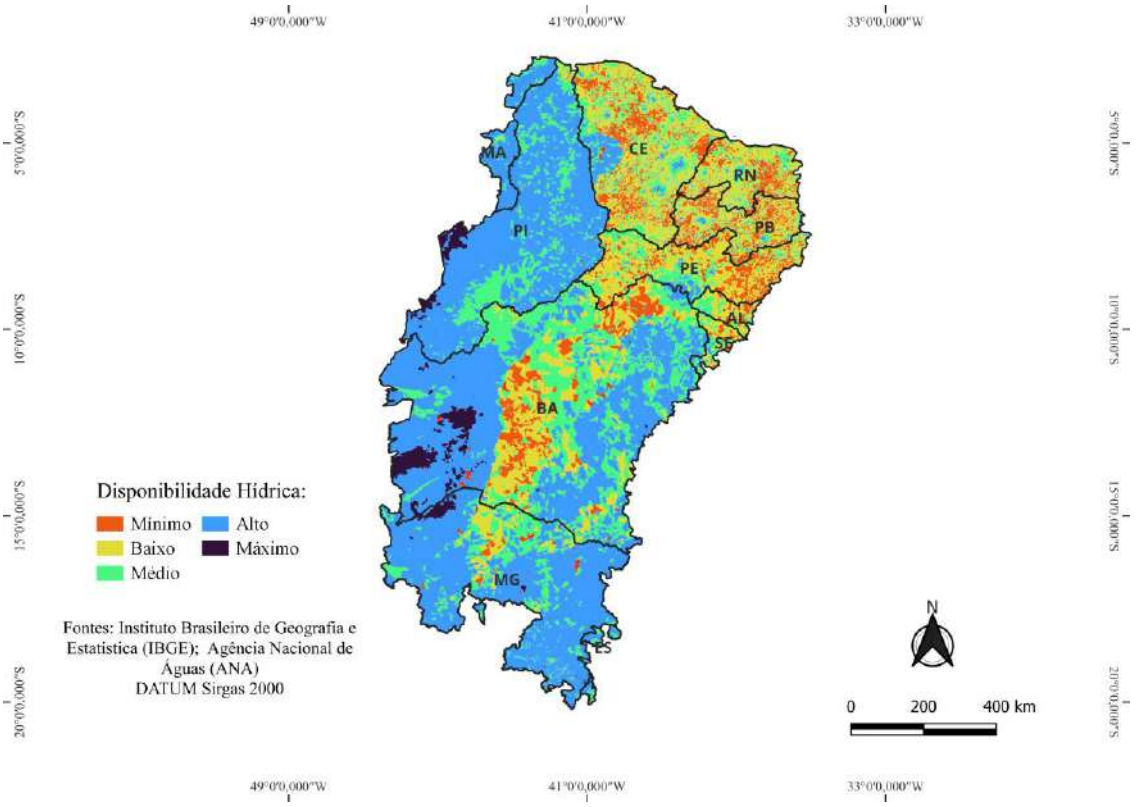


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Contudo, ao se considerar o contexto das localidades que apresentam maior vulnerabilidade hídrica, observa-se um contraste relevante. As áreas que concentram as populações mais dependentes de alternativas para o abastecimento de água correspondem, em

sua maioria, às regiões classificadas com condições climáticas intermediárias e secas. Conforme a classificação de disponibilidade hídrica elaborada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), apresentada na Figura 33, as classes de disponibilidade mínima, baixa e média localizam-se predominantemente nas porções centro-norte do Semiárido, coincidindo com as áreas mais secas identificadas no mapa integrado da Figura 32.

Figura 33. Disponibilidade Hídrica na região do Semiárido Brasileiro



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Assim, a inserção da tecnologia de sorção de água atmosférica no Semiárido requer que os esforços científicos e tecnológicos sejam orientados prioritariamente às regiões mais vulneráveis à escassez e à insuficiência hídrica. Essas áreas correspondem, em sua maioria, às faixas climáticas mais secas, associadas a condições ambientais mais severas e níveis de umidade relativa mais baixos. Dessa forma, os métodos de sorção a serem selecionados para aplicação nessas regiões precisam levar em consideração tais limitações climáticas, priorizando tecnologias mais eficientes em faixas de baixa umidade e capazes de operar sob condições térmicas extremas.

5.5.2 Dispositivos de sorção e adequação às variabilidades climáticas

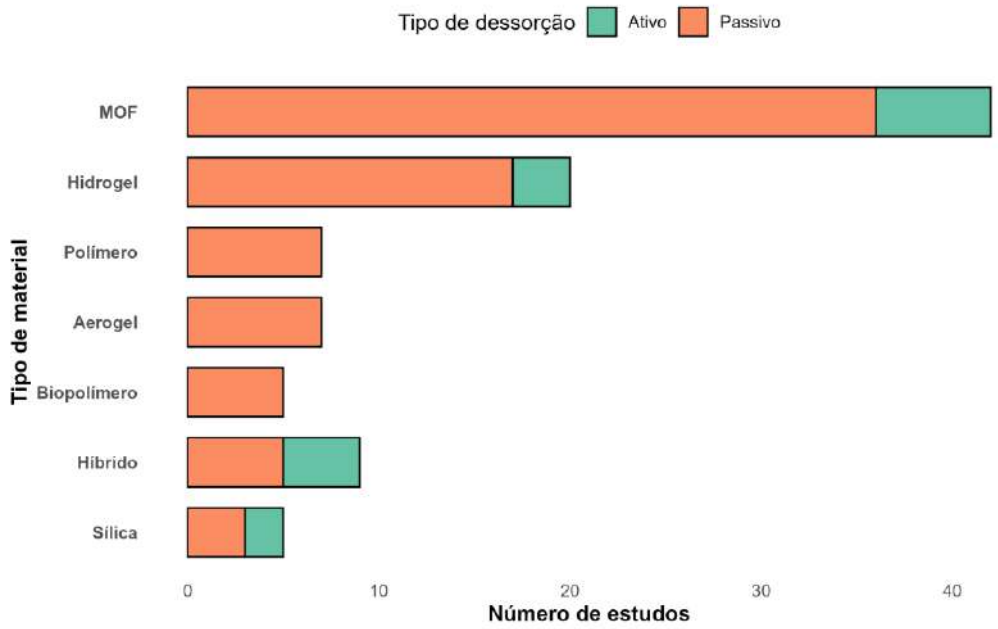
A partir dos resultados obtidos ao longo deste trabalho, observa-se que os dispositivos baseados na sorção de água atmosférica apresentam ampla diversidade de métodos e materiais empregados. Os estudos analisados evidenciam que os sistemas de captação variam quanto ao tipo de sorção, ao mecanismo de dessorção e à faixa de umidade relativa em que operam, refletindo a versatilidade e o avanço tecnológico da área. De modo geral, verifica-se que a maioria dos autores emprega dispositivos com a utilização de sorventes, nos quais as diferentes combinações de substâncias e estruturas resultam em variações significativas na capacidade de sorção.

Considerando as condições climáticas características do Semiárido Brasileiro, a adequação desses métodos requer especial atenção à faixa de umidade relativa predominante na região, que, conforme observado nos dados climatológicos, costuma situar-se na média de 58%. Dessa forma, os dispositivos que apresentam bom desempenho em baixas faixas de umidade tornam-se os mais promissores para aplicação local, especialmente aqueles que capacidade de sorção relativamente elevada mesmo sob condições áridas.

Analisando os métodos de sorção que utilizam sorventes como base, observa-se, na Figura 34, a frequência dos principais tipos de materiais empregados nos estudos, considerando a faixa de umidade relativa voltada à aplicação no Semiárido Brasileiro. Nota-se que os MOFs apresentam maior frequência entre os materiais analisados, seguidos pelos hidrogéis e pelos materiais híbridos, que combinam diferentes substâncias sorventes. Em menores proporções, aparecem também os polímeros, biopolímeros, aerogéis e sílica, evidenciando a variedade de alternativas exploradas na literatura recente.

A Figura também apresenta a classificação quanto ao tipo de dessorção observado nos dispositivos. Verifica-se que a maior parte dos materiais analisados é aplicada em sistemas passivos, enquanto os ativos surgem em menor número, concentrando-se principalmente em alguns dispositivos à base de MOFs, hidrogéis, sílica e híbridos. Essa predominância de sistemas passivos reforça a busca por tecnologias de baixo consumo energético e maior viabilidade em ambientes áridos.

Figura 34. Tipos de materiais sorventes e predominância dos mecanismos de dessorção nos dispositivos de sorção atmosférica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Considerando os materiais sorventes e a quantidade média de água captada, a Figura 35 apresenta a variação da capacidade de sorção (g g^{-1}) entre os diferentes tipos de materiais analisados. Observa-se que os MOFs, os hidrogéis e os compostos híbridos exibem as maiores medianas de sorção, além de valores máximos significativamente superior aos demais, representados por valores extremos (outliers).

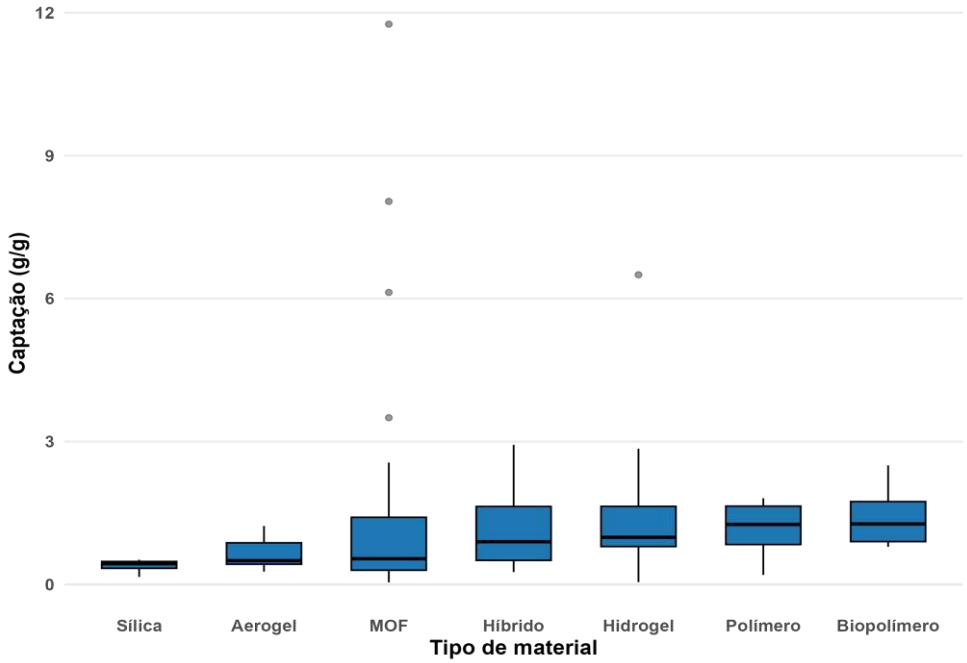
Entre os MOFs, destaca-se o estudo de Kang et al. (2024), que obteve 11,76 g g^{-1} utilizando uma estrutura modificada para acelerar a cinética de sorção e promover regeneração rápida sob luz solar. De forma semelhante, Maity et al. (2023) relataram 6,5 g g^{-1} com hidrogéis de rede núcleo-casca altamente hidratável, os quais aumentaram a difusão de vapor e a retenção de água. Os materiais híbridos, como os desenvolvidos por Shan et al. (2022), também apresentaram desempenho elevado (2,93 g g^{-1}), atribuído à integração entre componentes orgânicos e inorgânicos, que favoreceu a difusividade e a resposta térmica do sistema.

Por outro lado, polímeros, biopolímeros, sílica e aerogéis exibem valores médios mais estáveis e inferiores, refletindo menor variabilidade e desempenho reduzido sob condições de baixa umidade. Estudos como o de Li et al. (2024), que empregaram MOFs incorporados em matriz polimérica (0,04 g g^{-1}), e Zhang et al. (2024), com aerogéis de sílica (0,27 g g^{-1}), associam o baixo rendimento à limitada difusão interna de vapor e à menor área superficial efetiva. De modo semelhante, o hidrogel analisado por Liu et al. (2024) apresentou rendimento

reduzido (0,05 g g^{-1}), em função da baixa densidade energética e da pouca ativação dos grupos hidrofílicos.

Esses resultados evidenciam que, embora materiais como aerogéis e sílicas apresentem elevada estabilidade térmica, sua capacidade de sorção tende a ser limitada em ambientes de baixa umidade. Em contrapartida, MOFs e hidrogéis demonstram maior potencial para aplicação no contexto do Semiárido Brasileiro, sobretudo quando projetados para operar eficientemente em faixas reduzidas de umidade relativa.

Figura 35. Distribuição da capacidade média de sorção (g g^{-1}) dos principais materiais empregados na sorção de água atmosférica em umidades abaixo de 60 %



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Ainda sobre os tipos de materiais sorventes, a Tabela 5 apresenta os principais compostos químicos empregados em cada grupo de material de sorção. Observa-se que os sais higroscópicos, especialmente o cloreto de lítio (LiCl) e o cloreto de cálcio ($CaCl_2$), são amplamente utilizados em diferentes matrizes, aparecendo em cerca de 20 e 11 estudos, respectivamente, aplicados entre hidrogéis, biopolímeros, polímeros, sílicas, aerogéis e MOFs. Além desses, o composto MOF-801 também se destaca, sendo mencionado em cinco estudos, particularmente em estruturas híbridas e metálicas-orgânicas.

Tabela 5. Principais compostos químicos empregados nos materiais sorventes e respectivas frequências de uso.

Tipo de material	Composição e Frequência de ocorrência
Aerogel	ILCA Loofah/Alginate (2); Moisture-Indicating (1); PU-CA/Carbon Ink Aerogel (1); PNIPAm/HPC/E-LiCl/PANI (1); SA-TA-5/Fe^{3+} + LiCl (1).
Biopolímero	CAL gel + LiCl (1); $CaCl_2$ (1); LiCl (1); LiCl + CNMC (1); Pectin + LiCl (1); Pectin/$CaCl_2$ (1); Cellulose CNF@$CaCl_2$ (1); Ca-Alginate (1).
Híbrido	Li-SHC (3); PMC aerogel com 0,5 g MOF-801-G (1); C-LHA (1); PANI/MXene (1).
Hidrogel	CPPY@LiCl (2); Hydroxypropyl Cellulose (HPC) (1); LiCl (6); $CaCl_2$ (4); PAM-CMCNa-GO@$CaCl_2$ (2); PVA-LiCl (1); Zwitterionic Hydrogel (1); Sodium Alginate Hydrogel (1).
MOF	MOF-801 (5); $CaCl_2$ (4); MOF derivado + sal higroscópico (3); MIL-101(Cr) (2); UiO-66-NH_2 (2); MIL-160(Al) (1); MOF-808 (1); ZIF-8 (1); HKUST-1 (1).
Polímero	LiCl/PMS/CNTs (2); LiCl@PC-PPy (1); PPy-COF@Triazine (1); (LiCl)/Nanocarbono Preto (1); SHCP-10 (1).
Sílica	LiCl (1); SiO_2 + Carbon Black (1); Sílica Gel (1); Sílica + LiCl (1).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O LiCl aparece com maior frequência por sua elevada higroscopicidade, favorecendo a sorção de vapor d'água em baixas umidades relativas e permitindo regeneração térmica sob aquecimento moderado. Isso é observado, por exemplo, em Deng et al. (2023), que incorporam LiCl em aerogéis macroporosos (SA-TA/Fe^{3+}@LiCl) e reportam ganho de desempenho na sorção e na cinética de dessorção; resultados consistentes com a literatura recente que adiciona LiCl em hidrogéis e polímeros para ampliar a afinidade água–sorvente e a liberação sob aquecimento solar (WANG et al., 2023; LIU et al., 2024). Em síntese, o uso recorrente do LiCl associa-se à sua forte higroscopicidade e sua versatilidade e compatibilidade com diferentes matrizes (aerogel, hidrogel, polímero e híbridos), com bom desempenho em UR < 60 %.

Por sua vez, o $CaCl_2$, também altamente higroscópico, é frequentemente escolhido quando se priorizam estabilidade e custo. Estudos que incorporam $CaCl_2$ em hidrogéis e biopolímero, por exemplo, PAM-CMCNa-GO@$CaCl_2$ e Cellulose CNF@$CaCl_2$, relatam desempenho consistente e ciclos estáveis sob variação térmica, embora com atenção à deliquescência em altas cargas salinas (SHAN et al., 2022; ZHOU et al., 2024). Além disso, o

$CaCl_2$ responde rapidamente às variações de UR, o que favorece sistemas passivos de baixa energia. Assim, a recorrência desses sais reflete um equilíbrio: sorção elevada com LiCl e maior robustez/custo competitivo com $CaCl_2$, aspectos decisivos para o Semiárido Brasileiro.

Em contrapartida aos métodos de sorção atmosférica baseados em sorventes, também foram identificadas tecnologias ativas de sorção operadas por resfriamento e condensação, as quais demandam energia elétrica para seu funcionamento. Esses dispositivos, embora eficientes em condições controladas, apresentam menor aplicabilidade nas condições climáticas típicas do Semiárido Brasileiro, em virtude do alto consumo energético e da necessidade de umidade mínima em torno de 60 % para operação adequada.

Entre os estudos analisados, Mendoza-Escamilla et al. (2019) avaliaram a viabilidade de um gerador atmosférico de água (AWG) em uma região semiárida do México afetada por mineração, observando uma taxa média de 0,75 L h^{-1} sob 60 % de umidade relativa. Resultados semelhantes foram observados por Feng et al. (2024), cujo sistema internamente refrigerado obteve 0,032 L h^{-1} em condições mais áridas (20 % UR), demonstrando o desafio de operação eficiente em faixas de umidade muito baixas.

Em destaque, o estudo de Oliveros-Villanueva, Vélez e Gonzalez-Quiroga (2023) apresentou desempenho significativamente superior, alcançando 11,75 L h^{-1} com o dispositivo *Watergen GEN-350*. Esse rendimento elevado está associado ao uso de um sistema de condensação otimizado, que emprega refrigeração de alta eficiência e controle digital de fluxo de ar, o que maximiza o ponto de orvalho e favorece a condensação em ambientes tropicais costeiros, como o norte da Colômbia. Ainda assim, os autores ressaltam que o alto custo energético (≈ 300 Wh L^{-1}) e a dependência de energia elétrica contínua limitam a aplicação dessa tecnologia em comunidades semiáridas com infraestrutura restrita.

Assim, embora os sistemas ativos por condensação apresentem maior potencial de sorção volumétrica, sua viabilidade climática e energética é inferior à dos métodos passivos por sorventes, os quais demonstram melhor adaptação às condições áridas e semiáridas, especialmente em regiões com umidade relativa inferior a 60 % e alta incidência solar.

5.5.3 Aplicabilidade e Desafios Tecnológicos da Sorção de Água Atmosférica no Semiárido Brasileiro

Considerando os dispositivos de sorção atmosférica analisados ao longo deste trabalho, observa-se uma diversidade de tecnologias e estudos voltados à utilização e adequação junto as

características climáticas típicas de regiões semiáridas. No entanto, torna-se necessário identificar com maior precisão quais tipos de dispositivos apresentam maior vantagem e aplicabilidade no contexto do Semiárido Brasileiro, levando em conta aspectos como seus resultados de eficiência, custo operacional e viabilidade técnica.

Ao se observar, por exemplo, os dispositivos baseados em resfriamento e condensação, é importante reconhecer que esses sistemas dependem de uma fonte contínua de energia elétrica para o funcionamento, o que representa uma limitação significativa em regiões com infraestrutura energética restrita. Estudos feitos por Mendoza-Escamilla et al. (2019), Oliveros-Villanueva et al. (2023) e Feng et al. (2024) destacam o alto consumo energético como a principal desvantagem desse tipo de tecnologia, uma vez que eleva substancialmente os custos operacionais. Além disso, os autores afirmam que a eficácia desses dispositivos está fortemente condicionada às características climáticas locais, sendo mais eficientes em ambientes de maior altitude, regiões costeiras ou áreas com formação frequente de neblina e ventos, que favorecem o processo de resfriamento e condensação do ar para a produção de água.

Esses dispositivos, por dependerem de energia elétrica, geralmente requerem instalações fixas e apresentam alto custo inicial, embora possuam baixa demanda de manutenção e permitam a obtenção direta de água potável após a instalação. A produção varia amplamente, desde unidades de pequeno porte com capacidade de cerca de 30 L/dia até equipamentos industriais que podem ultrapassar 6 000 L/dia, refletindo também na variação de preços, que podem ir de R$ 7 000 a mais de R$ 300 000, conforme a capacidade e o fabricante. Um desafio adicional está na disponibilidade comercial limitada dessas tecnologias no Brasil, já que muitas marcas internacionais com bom desempenho não possuem representação no país, dificultando a aquisição e a manutenção dos equipamentos (WATERGEN, 2025).

Quanto aos dispositivos sorventes, em contraponto aos sistemas ativos, diversos autores justificam sua adoção pela possibilidade de dessorção passiva, que visa eliminar a dependência de energia elétrica, utilizando como principal fonte apenas a energia solar. Essa característica confere aos sistemas sorventes um apelo sustentável e maior potencial de aplicabilidade em regiões semiáridas, onde a disponibilidade de radiação solar é elevada e o acesso à rede elétrica nem sempre é garantido.

Entretanto, grande parte dos estudos com sorventes ainda se concentra em ensaios laboratoriais, conduzidos em escala reduzida e com metodologias experimentais relativamente simples. Por esse motivo, de modo geral, observa-se que as quantidades efetivas de água sorvida são significativamente menores quando comparadas às obtidas por dispositivos ativos, sendo normalmente expressas em gramas de água coletada por grama de sorvente aplicado ($g\ g^{-1}$).

Além disso, alguns materiais apresentam ciclos de sorção limitados, com degradação progressiva de desempenho ao longo do tempo, o que reduz sua durabilidade e eficiência operacional.

Essas pesquisas concentram-se, em sua maioria, no desenvolvimento e caracterização dos materiais sorventes, com ênfase na avaliação de propriedades como estrutura, desempenho higroscópico e eficiência de dessorção solar. Entretanto, observa-se que poucos trabalhos abordam de forma detalhada os aspectos econômicos e a viabilidade de produção em larga escala desses sistemas. Embora alguns autores classifiquem os materiais sorventes como alternativas de baixo custo e ambientalmente amigáveis (DING et al., 2020; HU et al., 2023), em virtude do uso de compostos relativamente acessíveis e da possibilidade de dessorção passiva impulsionada pela energia solar, essa percepção tende a desconsiderar os custos adicionais relacionados à estruturação do dispositivo, especialmente no que se refere às bases de suporte, sistemas de deposição e encapsulamento dos sorventes, indispensáveis para garantir a operação eficiente e duradoura da tecnologia.

Além disso, a literatura menciona explicitamente a complexidade e o custo elevado de fabricação de certas bases e matrizes sorventes. Esses processos geralmente envolvem o uso de reagentes caros, como solventes orgânicos, sais metálicos de alta pureza e catalisadores específicos, além de demandarem condições de temperatura e pressão elevadas, o que aumenta significativamente o consumo energético. Soma-se a isso a geração potencial de resíduos tóxicos e poluentes, comprometendo a sustentabilidade ambiental dos métodos de síntese (LU et al., 2022). Dessa forma, o custo agregado de fabricação, aliado ao uso dos próprios sorventes, tende a elevar o investimento total da tecnologia, tornando-se um fator crítico a ser analisado, sobretudo quando se considera a aplicação em regiões com escassez hídrica e vulnerabilidade socioeconômica, como o Semiárido Brasileiro.

Outro aspecto relevante refere-se à ampla variedade de tipos de materiais sorventes. A escolha adequada do material é determinante para a eficiência do dispositivo, e deve considerar tanto o desempenho quanto a adaptabilidade às condições locais. Nos estudos analisados, ainda que os autores frequentemente classifiquem os sorventes como boas alternativas tecnológicas, há limitações específicas a serem consideradas. Materiais como hidrogéis, aerogéis e polímeros são frequentemente associados a baixa fração de sais e à ocorrência de vazamentos quando há excesso de solução ou alta taxa de sorção (HUANG et al., 2024; XU et al., 2024). Além disso, observa-se o desafio de deliquescência e aglomeração de sais, o que compromete a estabilidade e a reutilização dos materiais (ZHANG et al., 2024).

Os dispositivos baseados em sílica apresentam, em geral, ciclos de sorção mais lentos, embora alguns estudos apontem a possibilidade de maior número de reutilizações sucessivas, como relatado por Chen et al. (2024) e Shao et al. (2024). Essa característica confere aos materiais silicosos uma vantagem operacional em contextos de longa duração, ainda que com menor rendimento por ciclo.

Os biopolímeros, por sua vez, têm emergido como alternativas de destaque por enfrentarem as limitações dos materiais sintéticos convencionais, frequentemente associados a processos de síntese complexos, custos elevados e baixa produtividade. Ao empregarem biomassa renovável e de baixo custo (YAO et al., 2022), esses materiais promovem uma rota tecnológica mais acessível e ambientalmente favorável. Tal abordagem representa uma evolução frente aos dispositivos de gerações anteriores, cuja dependência de reagentes caros e rotas elaboradas dificultava a produção em escala e a difusão tecnológica (GONG et al., 2020).

No caso dos materiais metal-orgânicos, os resultados experimentais demonstram elevada capacidade de sorção e ciclos rápidos de regeneração, além de estruturas porosas que mitigam problemas típicos de sais deliquescentes, como o vazamento e a perda de material ativo (TERZIS et al., 2020). Contudo, a complexidade sintética e o alto custo de produção desses compostos permanecem como obstáculos para sua adoção em larga escala (YAN et al., 2024).

Mais recentemente, os materiais híbridos têm se consolidado como uma rota promissora por combinar as propriedades complementares de diferentes classes sorventes. Desenvolvidos a partir de matérias-primas amplamente disponíveis e economicamente viáveis (SHAN et al., 2022), esses compósitos alcançam melhor equilíbrio entre eficiência de captação, estabilidade estrutural e custo de produção (YAN et al., 2024). A integração de estruturas porosas inorgânicas com polímeros e sais regeneráveis tem mostrado resultados consistentes, indicando um caminho tecnológico viável para aplicações em ambientes semiáridos e condições de baixa umidade relativa.

5.5.4 Considerações sobre a Aplicação da Sorção Atmosférica no Semiárido Brasileiro

Analisando os resultados discutidos até aqui e estabelecendo uma inter-relação entre as características climáticas específicas do Semiárido Brasileiro e os diferentes dispositivos de sorção de água atmosférica, torna-se evidente a ampla gama de tecnologias potencialmente aplicáveis como alternativa complementar à disponibilidade hídrica regional.

Os dispositivos de sorção, subdivididos em sistemas de resfriamento e condensação e em sistemas baseados no uso de sorventes, apresentam particularidades distintas quanto à forma de operação e às condições ideais de desempenho. Considerando o que foi abordado sobre cada categoria e as características ambientais da região semiárida, observa-se que ambas possuem potencial de aplicação, ainda que com limitações específicas.

Os sistemas de resfriamento e condensação dependem de energia ativa e de condições climáticas mais favoráveis, como maior ventilação, melhores índices de umidade e proximidade de áreas costeiras, que facilitam a condensação do vapor d'água. Assim, essa alternativa mostra-se mais adequada a centros urbanos com infraestrutura consolidada e fornecimento contínuo de energia elétrica, além das porções leste do Semiárido, próximas ao litoral e às transições climáticas com ambientes mais úmidos.

Por outro lado, os dispositivos baseados em sorventes destacam-se pela operação passiva e pela melhor eficiência em ambientes de baixa umidade, o que os torna mais promissores para áreas centrais do Semiárido, onde as condições climáticas são mais severas e o acesso à energia é limitado. Nessas localidades, muitas vezes isoladas e com infraestrutura precária, os dispositivos sorventes poderiam representar uma alternativa de maior viabilidade social e energética.

Contudo, é importante ressaltar que, embora ambas as abordagens apresentem potencial de aplicação, a implementação em escala real ainda exige esforços significativos. Os sistemas de resfriamento e condensação encontram-se em nível tecnológico mais avançado e já apresentam disponibilidade comercial no mercado internacional; porém, seus altos custos de aquisição e manutenção limitam o acesso em contextos de vulnerabilidade. Já as tecnologias baseadas em sorventes permanecem em fase laboratorial, com estudos ainda concentrados na síntese e caracterização de materiais. Apesar de demonstrarem efetividade promissora e ampla diversidade de compósitos, sua aplicação prática no Semiárido dependerá do desenvolvimento de métodos produtivos simplificados e economicamente viáveis, que permitam competir com os níveis de captação atualmente obtidos por dispositivos refrigerados e condensadores.

Por fim, é fundamental considerar que a busca por alternativas hídricas no Semiárido está intrinsecamente relacionada ao enfrentamento da escassez hídrica em comunidades inteiras, muitas delas isoladas e com baixo poder aquisitivo. Assim, torna-se improvável que a população-alvo possa arcar sozinha com os custos de operação dessas tecnologias. Diante disso, políticas públicas e programas institucionais seriam essenciais para subsidiar a implementação, o desenvolvimento e a manutenção dessas soluções, uma vez que a garantia de acesso à água

representa não apenas uma questão ambiental e tecnológica, mas também um direito social e uma responsabilidade de saúde pública.

5.6 Discussão Geral

Os resultados obtidos a partir das análises climáticas, bibliométricas e espaciais permitem uma discussão integrada acerca da viabilidade técnica, ambiental e territorial da sorção de água atmosférica como alternativa complementar à segurança hídrica em regiões semiáridas. A articulação entre o diagnóstico climático regional e o levantamento sistemático da produção científica internacional possibilitou não apenas identificar as tecnologias mais promissoras, mas também compreender suas limitações frente às condições ambientais reais do Semiárido Brasileiro.

A revisão sistemática e bibliométrica evidenciou um crescimento expressivo da produção científica relacionada à sorção de água atmosférica nas últimas duas décadas, refletindo o fortalecimento global das pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais sorventes avançados e de sistemas de captação baseados em dessorção solar passiva. Observou-se uma concentração significativa de estudos em países asiáticos, impulsionada principalmente por investimentos em estruturas metal-orgânicas (MOFs), hidrogéis e sais higroscópicos, o que indica uma tendência internacional voltada à maximização da eficiência de sorção em faixas de umidade relativa reduzidas e à diminuição da dependência energética desses sistemas.

No conjunto de dispositivos identificados, verificou-se a coexistência de duas abordagens tecnológicas principais: os sistemas baseados em resfriamento e condensação e aqueles fundamentados no uso de materiais sorventes. Entretanto, a análise revelou uma predominância clara de estudos voltados aos sistemas sorventes, em razão da maior diversidade de materiais disponíveis e do desempenho mais consistente sob condições de baixa a intermediária umidade relativa do ar.

Enquanto os dispositivos por resfriamento e condensação apresentaram eficiência satisfatória apenas em ambientes com umidade superior a 60%, os sistemas sorventes, especialmente aqueles compostos por MOFs, hidrogéis e compósitos à base de sais higroscópicos como LiCl e $CaCl_2$, demonstraram bom desempenho em faixas de umidade entre 30% e 60%, operando majoritariamente de forma passiva e com menor demanda energética.

Esse direcionamento da literatura científica evidencia a busca por soluções mais sustentáveis e compatíveis com ambientes áridos e semiáridos, como o Semiárido Brasileiro.

A análise climática regional, fundamentada em dados de 110 estações meteorológicas automáticas do INMET no período de 2004 a 2023, confirmou o predomínio de condições ambientais restritivas à disponibilidade hídrica. Os resultados indicaram uma umidade relativa média anual em torno de 58%, precipitação média anual aproximada de 660 mm, temperaturas médias elevadas, próximas a 26,1 °C, e velocidades médias de vento da ordem de 2,2 m s^{-1}. Esses valores caracterizam um ambiente de elevada variabilidade climática, marcado por déficit hídrico recorrente e longos períodos secos, reforçando o enquadramento do Semiárido Brasileiro entre as regiões de maior vulnerabilidade hídrica do país. Nesse contexto, torna-se evidente que as tecnologias de sorção atmosférica com melhor desempenho em faixas intermediárias e baixas de umidade relativa são as mais compatíveis com o cenário climático regional.

A integração dessas variáveis climáticas foi realizada por meio da aplicação do método de Análise Hierárquica de Processos (AHP), que permitiu ponderar a importância relativa de cada parâmetro ambiental na aplicabilidade das tecnologias de sorção atmosférica. Os pesos atribuídos foram de 0,466 para a umidade relativa, 0,277 para a precipitação, 0,161 para a velocidade dos ventos e 0,096 para a temperatura, totalizando unidade e atendendo aos pressupostos metodológicos do modelo. A verificação da consistência da matriz decisória indicou valores adequados, assegurando a coerência interna e a reprodutibilidade do procedimento adotado.

O mapa-síntese resultante da modelagem espacial evidenciou zonas com diferentes níveis de potencial para aplicação das tecnologias de sorção de água atmosférica. As áreas situadas nas porções leste do Semiárido, próximas ao litoral e às zonas de transição climática, apresentaram maior favorabilidade, em função da combinação entre umidade moderada e melhor infraestrutura energética, favorecendo a aplicação de sistemas baseados em resfriamento e condensação. Em contrapartida, as áreas centrais do Semiárido, caracterizadas por menores índices de umidade relativa e maior severidade climática, mostraram-se mais adequadas à aplicação de dispositivos sorventes passivos, cuja eficiência permanece satisfatória mesmo sob condições ambientais adversas.

Cabe destacar que os mapas produzidos por meio do método de interpolação IDW devem ser interpretados como instrumentos de apoio à identificação de padrões espaciais regionais, e não como representações determinísticas em escala local. Ainda assim, os

resultados obtidos são consistentes com a literatura e permitem orientar a discussão sobre a adequação territorial das diferentes tecnologias de sorção atmosférica.

De modo geral, os resultados indicam que a sorção de água atmosférica deve ser compreendida como uma tecnologia complementar às demais fontes hídricas existentes, e não como uma solução isolada ou substitutiva. Quando integrada a políticas públicas de convivência com o semiárido e a programas institucionais de segurança hídrica, essa tecnologia pode contribuir de forma significativa para a ampliação do acesso à água em comunidades vulneráveis, especialmente durante períodos prolongados de estiagem.

Apesar do potencial identificado, permanecem desafios relevantes para a aplicação em escala real. Os sistemas por resfriamento e condensação, embora tecnologicamente mais maduros e disponíveis comercialmente, apresentam elevados custos energéticos e financeiros, limitando sua adoção em contextos de vulnerabilidade socioeconômica. Por sua vez, as tecnologias baseadas em sorventes ainda se concentram majoritariamente em estudos laboratoriais, com lacunas relacionadas à durabilidade dos materiais, à viabilidade econômica e à validação em campo. Dessa forma, o avanço dessas tecnologias no Semiárido Brasileiro dependerá do desenvolvimento de rotas produtivas simplificadas, da redução de custos e do fortalecimento de políticas de fomento à pesquisa aplicada, inovação tecnológica e parcerias público-privadas, de modo a viabilizar a transição do ambiente experimental para aplicações efetivas em escala social.

6 CONCLUSÃO

A construção e interpretação dos resultados elaborados nessa dissertação demonstram que a sorção de água atmosférica apresenta viabilidade técnica e ambiental como alternativa complementar ao abastecimento hídrico no Semiárido Brasileiro, desde que sua aplicação seja adequadamente compatibilizada com as condições climáticas locais, o estágio de desenvolvimento tecnológico dos dispositivos e o contexto socioeconômico das populações atendidas. A abordagem metodológica integrada, baseada na revisão sistemática, análise bibliométrica, diagnóstico climático e modelagem espacial multicritério, permitiu responder de forma consistente aos objetivos propostos, estabelecendo uma relação direta entre os avanços científicos da área e a realidade ambiental do semiárido.

A análise da produção científica evidenciou o crescimento expressivo das pesquisas sobre sorção atmosférica, com predominância de estudos voltados aos materiais sorventes, como MOFs, sílica, hidrogéis e compósitos com sais higroscópicos. Esses sistemas destacam-se pela capacidade de operar em faixas de umidade relativa moderada a baixa, além de possibilitarem a regeneração por energia solar, característica particularmente compatível com as condições climáticas do Semiárido Brasileiro.

O diagnóstico climático confirmou um cenário de déficit hídrico estrutural, marcado por temperaturas médias elevadas, precipitação limitada e umidade relativa média anual em torno de 58%. A aplicação do método AHP permitiu identificar a heterogeneidade espacial do potencial de aplicação da sorção atmosférica no território semiárido. Os resultados indicaram maior adequação dos sistemas de resfriamento e condensação em áreas com melhor infraestrutura energética e índices mais elevados de umidade, especialmente nas porções leste da região, enquanto os dispositivos baseados em sorventes mostraram-se mais promissores e necessários para a porção central do semiárido, caracterizada por maior aridez e menor acesso à energia elétrica.

Apesar do potencial identificado, os resultados também evidenciam limitações relevantes. Os sistemas de resfriamento e condensação apresentam elevados custos de aquisição e operação, enquanto a maioria dos dispositivos sorventes permanece em estágio experimental, com desafios associados à durabilidade dos materiais, eficiência em escala real e viabilidade econômica. Assim, a sorção atmosférica não deve ser compreendida como substituta das fontes hídricas convencionais, mas como uma tecnologia complementar, especialmente pertinente para contextos de vulnerabilidade hídrica e isolamento territorial.

Por fim, conclui-se que a consolidação da sorção de água atmosférica no Semiárido Brasileiro dependerá do avanço de pesquisas aplicadas, de validações em campo e do fortalecimento de políticas públicas e programas institucionais capazes de viabilizar sua implementação. Quando integrada a estratégias de convivência com o semiárido e ao uso de fontes renováveis de energia, essa tecnologia apresenta potencial para contribuir de forma significativa para a segurança hídrica regional, alinhando-se aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável e às demandas contemporâneas de adaptação às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. 2016. Disponível em: https://www.aesa.pb.gov.br. Acesso em: 27 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Plano Nacional de Recursos Hídricos PNRH. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/planos-de-recursos-hidricos/plano-nacional-de-recursos-hidricos-pnrh. Acesso em: 30 jul. 2025.

AGRAWAL, R.; RAJPUT, A.; KAWDE, A.; VERMA, S.; AHMED, M. J.; SRIVASTAVA, V. Silica gel-based atmospheric water harvesting system with evacuated tube solar heater. Journal of Cleaner Production, v. 419, p. 138356, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138356.

ÁGUA SUSTENTÁVEL. Água na região Nordeste: uma escassez histórica e política. 2023. Disponível em: https://www.aguasustentavel.org.br/conteudo/blog/160-agua-na-regiao-nordeste. Acesso em: 2 ago. 2025.

AGYEKUM, Ephraim Bonah; ODOI-YORKE, Flavio; MBASSO, Wulfran Fendzi; DARKO, Ransford Opoku; ADEGBOYE, Oluwatayomi Rereloluwa; ABBEY, Agnes Abeley. Towards a comprehensive understanding of atmospheric water harvesting technologies – a systematic and bibliometric review. Energy Reports, v. 12, p. 3795–3811, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.059.

ALADOS, C. L.; PUIGDEFABREGAS, J.; MARTINEZFERNANDEZ, J. Ecological and socio-economical thresholds of land and plant-community degradation in semi-arid Mediterranean areas of southeastern Spain. Journal of Arid Environments, London, v. 75, n. 12, p. 1368-1376, Dec. 2011.

ALI, M. H.; TALUKDER, M. S. U. Increasing water productivity in crop production: a synthesis. Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 95, n. 11, p. 1201- 1213, Nov. 2008.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G.Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

ANDRADE, Manuel C. A Terra e o Homem no Nordeste. São Paulo, Brasiliense, 1963b, 265p. 2. ed.: São Paulo, Ed. Brasiliense, 1964. 3. ed.: (revista e atualizada), 1973. 4. ed. (revista e atualizada). São Paulo, Ed. Ciências Humanas, 1980. 5. ed.: Contribuição ao estudo da questão agrária no Nordeste. São Paulo, Atlas, 1986. 8. ed. São Paulo: Cortez, 2011.

ARAÚJO, E. de L.; MORAES NETO, J. M. de; SOUSA, F. A. S. de. Análise climática da bacia do rio Paraíba – índice de anomalia de chuva (IAC). Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia, [S. l.], v. 6, n. 3, 2009. Disponível em: http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=344&locale=e. Acesso em: 2 ago. 2025.

BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCDONALD, C. J.; AROCA-DELGADO, R.; RODRÍGUEZ-VALERO, E.; ALBARDÍA-ROBLES, R.; GARCÍA-MORALES, D.; RUIZ-

BEITHOU, Nabil; HOUACHE, M.; BOUSSAID, B.; ADOUL, M. T.; ALKALI, K.; ZEMMOURI, M. R. Atmospheric water harvesting technology: review and future prospects. Journal of Ecological Engineering, v. 25, n. 3, p. 291–302, 2024. DOI: 10.12911/22998993/182814

BRAMBILLA, Arianna; GASPARRI, Eugenia; ZOLFAGHARI, Ladan; KESHAVARZI, Rojin; ANDALORO, Annalisa. On the applicability of atmospheric water harvesting technologies on building facades: A critical review. Journal of Cleaner Production, v. 366, p. 132809, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132809.

Brandão, G. K. E., Tavares, B. A. C. (2020). Análise paleoambiental do contexto fluvial do vale do rio carnaúba: navegabilidade pretérita associada às imagens de pirogas presentes no contexto arqueológico da área arqueológica do Seridó, Carnaúba dos Dantas – RN. Revista Noctua, 2(5), 83–105. https://doi-org.ez87.periodicos.capes.gov.br/10.26892/noctua.v2i5p83-105.

BRASIL. Estudo do Cemaden e do INPE identifica, pela primeira vez, a ocorrência de uma região árida no país. Cemaden, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/estudo-do-cemaden-e-do-inpe-identifica-pela-primeira-vez-a-ocorrencia-de-uma-regiao-arida-no-pais. Acesso em: 04 jun. 2025.

BRASIL. Lei nº 13.153, de 30 de julho de 2015. Institui a Política Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13153.htm. Acesso em: 04 jun. 2025.

BRITO, Luiz Tadeu; GALVÃO, Carlos de Oliveira; PEREIRA, Givanildo Modesto. Uso e manejo de águas em regiões semiáridas: o caso do Semiárido brasileiro. Ciência e Cultura, v. 55, n. 4, p. 20–23, 2003.

CABRAL, Laíse do Nascimento; XAVIER, Juliana Meira de Vasconcelos; ROCHA, Divanda Cruz. Soluções para o problema da água no semiárido nordestino: as secas e suas conseqüências. In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 1., 2013, Campina Grande, PB. Anais [...]. Campina Grande, PB: [s. n.], 2013. p. 1-15. Disponível em: "Modalidade_4datahora_31_10_2013_21_44_45_idinscrito_204_4a51df0283dd81eb9eb3e8c4fb97fd19.pdf". Acesso em: 2 ago. 2025.

CALERO, C. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Scientific Data, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 1–11, 2023. DOI: 10.1038/s41597-023-02302-3.

CAMPOS, J. N. B. Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos. Revista Estudos Avançados, v. 28, n. 82, 2014.

CARVAJAL, D.; SILVA-LLANCA, L.; LARRAGUIBEL, D.; GONZÁLEZ, B. On the Aerodynamic Fog Collection Efficiency of Fog Water Collectors via Three-Dimensional Numerical Simulations. Atmos. Res. 2020, 245, 105123.

CAVALCANTE, G.P. As chuvas na região agreste da borborema, nordeste do brasil: proposta de setorização climática sob o enfoque da análise rítmica. Repositório Institucional da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa-PB, 2019.

CENDOYA, A.; CUEVAS, C.; WAGEMANN, E. Numerical evaluation of a hybrid atmospheric water harvesting system for human consumption. [S.l.], 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4480991.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN); INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Nota Técnica: Elaboração dos Mapas de índice de Aridez e Precipitação Total Acumulada para o Brasil. Brasil, 2023.

CHEN, C.; SALINGER, J. L.; ESSIG, M. E.; WALTON, I. M.; FULVIO, P. F.; WALTON, K. S. Hierarchical Silica Composites for Enhanced Water Adsorption at Low Humidity. ACS Applied Materials & Interfaces, v. 16, n. 22, p. 27118–27127, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acsami.4c09456. Acesso em: 13 jun. 2025.

CHEN, Kuanfu; TAO, Yujie; SHI, Weiwei. Recent Advances in Water Harvesting: A Review of Materials, Devices and Applications. Sustainability, v. 14, n. 10, p. 6244, 2022. DOI: 10.3390/su14106244.

CPTEC/INPE. El Niño e La Niña – Histórico de eventos ENOS. Cachoeira Paulista, SP: CPTEC/INPE, [s.d.]. Disponível em: https://enos.cptec.inpe.br/
. Acesso em: 03 out. 2025.

CRUZAT, D.; JEREZ-HANCKES, C. Electrostatic Fog Water Collection. J. Electrost. 2018, 96, 128–133.

CUI, D; LIANG, S; WANG, D. Observed and projected changes in global climate zones based on Köppen climate classification. WIREs Climate Change, v. 12, n. 3, 2021. Disponível em: <https://wires-onlinelibrary-wiley-com.ez87.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1002/wcc.701>. Acesso em: 3 jun. 2025.

CUNHA, D. A; BRAGA, M. J. Mudanças climáticas e convivência com o semiárido brasileiro. Viçosa - MG: UFV, IPPDS, 2022.

DANIŞMAZ, Merdin; ALHURMUZI, Mohammed. A Literature Review on Extraction of Potable Water from Atmospheric Air Using Solar Stills: Recent Developments. European Journal of Science and Technology (EJOSAT), n. 32, p. 991–999, 2021. DOI: 10.31590/ejosat.1039866.

DEDECEK, R. A. Fatores de erosividade da chuva, enxurrada e perdas de solo sob condições de cerrado. Pesq, agropec. bras., Brasília, 23(12):1431-1438, dez. 1988.

DENG, K.; ZHU, M.; CHEN, J.; WANG, Z.; YANG, H.; XU, H.; HE, G.; ZHAN, Y.; GU, S.; LIU, X.; SHANG, B. Macro-porous structured aerogel with enhanced ab/desorption kinetics for sorption-based atmospheric water harvesting. Journal of Colloid and Interface Science, [S. l.], v. 653, p. 904–915, 2023. DOI: 10.1016/j.jcis.2023.11.128.

DESCHEEMAEKER, K.; MAPEDZA, E.; AMEDE, T.; AYALNEH, W. Effects of integrated watershed management on livestock water productivity in water scarce areas in Ethiopia. Physics and Chemistry of the Earth, Oxford, v. 35, n. 13-14, p. 723-729, 2010.

DING, N.; LIANG, B.; GAO, X.; YAO, D.; CHEN, J.; LIU, C.; LU, C.; PANG, X. Vertically aligned sheet-like structural aerogel incorporated with expanded graphite for efficient solar desalination and atmospheric water harvesting. Chemical Engineering Journal, v. 487, art. 153470, 2024. DOI: 10.1016/j.cej.2024.153470.

EMBRAPA. Projeto RECHIDRO – Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas. Embrapa Meio Ambiente, 2023. Disponível em: https://www.cnpma.embrapa.br/projetos/ecoagua/princip/rechidro.html. Acesso em: 02 ago. 2025.

ENSSLIN, Leonardo; ENSSLIN, Sandra Rolim; LACERDA, Rogério; LACERDA, R. T. O. ProKnow-C, Knowledge Development Process–Constructivist: processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Florianópolis: [s. n.], 2010.

EZZAHAR, J.; CHEHBOUNI, A.; HOEDJES, J. C. B.; ERRAKI, S.; CHEHBOUNI, A.; BOULET, G.; BONNEFOND, J. M.; DE BRUIN, H. A. R. The use of the scintillation technique for monitoring seasonal water consumption of olive orchards in a semi-arid region. Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 89, n. 3, p. 173-184, May 2007.

FATHIEH, Farhad; KALMUTZKI, Markus J.; KAPUSTIN, Eugene A.; WALLER, Peter J.; YANG, Jingjing; YAGHI, Omar M. Practical water production from desert air. Science Advances, v. 4, n. 6, eaat3198, 2018. DOI: 10.1126/sciadv.aat3198.

FENG, Y.; GE, L.; LI, Q.; WANG, R.; GE, T. Internally-cooled atmospheric water harvesting enabling improved productivity. Water Research, v. 258, p. 122293, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122293.

FERNANDEZ, D.M.; TORREGROSA, A.; WEISS-PENZIAS, P.S.; ZHANG, B.J.; SORENSEN, D.; COHEN, R.E.; MCKINLEY, G.H.; KLEINGARTNER, J.; OLIPHANT, A.; BOWMAN, M. Fog Water Collection Effectiveness: Mesh Intercomparisons. Aerosol Air Qual. Res. 2018, 18, 270–283.

FERREIRA, L.S; SANTIAGO, D.B; SANTOS, E.M; ARAÚJO, R.C; LYRA, R.F.F. Estudo das Rajadas de Vento no Semiárido Brasileiro. Ci. e Nat., Santa Maria v.42, Special Edition: Micrometeorologia, e3, 2020. DOI:10.5902/2179460X45219.

FREITAS, M. A. S. A previsão de secas e a gestão hidroenergética: o caso da Bacia do Rio Parnaíba no nordeste do Brasil. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE REPRESAS Y OPERACIÓN DE EMBALSES, 2004, [Local]. Anais [...]. [S. l.]: [s. n.], 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275958581_A_Previsao_de_secas_e_a_gestao_hidroenergetica_o_caso_da_bacia_do_Rio_Parnaiba_no_Nordeste_do_Brasil. Acesso em: 2 ago. 2025.

FURUKAWA, H.; CORDOVA, K. E.; O'KEEFFE, M.; YAGHI, O. M. The chemistry and applications of metal–organic frameworks. Science, v. 341, n. 6149, p. 1230444, 2013. DOI: 10.1126/science.1230444.

GALVÃO, M.C.; RICARTE, I.L.M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. LOGEION: Filosofia da informação, Rio de Janeiro, v. 6 n. 1, p.57-73, set.2019/fev. 2020.

GIDO, B.; FRIEDLER, E.; BRODAY, D. M. Assessment of atmospheric moisture harvesting by direct cooling. Atmospheric Research, v. 182, p. 156–162, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.029

GLOBO. Como a recente descoberta do primeiro clima árido no Brasil pode impactar o restante do país. G1, 21 jan. 2024. Disponível em: https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2024/01/21/como-a-recente-descoberta-do-primeiro-clima-arido-no-brasil-pode-impactar-o-restante-do-pais.ghtml. Acesso em: 04 jun. 2025.

GONG, F.; LI, H.; LV, Y.; PAPAVASSILIOU, D. V.; WANG, M.; WANG, W.; XIAO, R.; ZHOU, Q. Agricultural waste-derived moisture-absorber for all-weather atmospheric water collection and electricity generation. Nano Energy, v. 74, art. 104922, p. 1–?, maio 2020. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.104922

HANIKEL, N.; PEI, X.; CHHEDA, S.; LYU, H.; JEONG, W.; SAUER, J.; GAGLIARDI, L.; YAGHI, O. M. Evolution of water structures in metal-organic frameworks for improved atmospheric water harvesting. Science, v. 374, n. 6566, p. 454–459, 2021. DOI: 10.1126/science.abj0890.

HAO, X.; GENG, S.; YUAN, L.; LUO, B. Study of Composite Scheme of Absorption/Desorption Method and Condensation Method for Extracting Water from Air. In Procedia Engineering; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 2017; Volume 205, pp. 2069–2075.

HU, Y.; WANG, Y.; FANG, Z.; YAO, B.; YE, Z.; PENG, X. Ca-MOF-Derived Porous Sorbents for High-Yield Solar-Driven Atmosphere Water Harvesting. ACS Applied Materials & Interfaces, v. 15, n. 38, p. 44942–44952, set. 2023.

HUANG, Z.; ZHANG, T.; JU, A.; XU, Z.; ZHAO, Y. Macroporous, Highly Hygroscopic, and Leakage-Free Composites for Efficient Atmospheric Water Harvesting. ACS Applied Materials & Interfaces, [S. l.], v. 16, n. 22, p. 26962–26971, 2024. DOI: 10.1021/acsami.4c01888.

INSA – INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. Projeto Água Atmosférica – Bebendo Água do Ar. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/insa/pt-br/assuntos/noticias/projeto-agua-atmosferica-2013-bebendo-agua-do-ar. Acesso em: 2 ago. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Mapas climáticos do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 2 ago. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO (INSA). Informações técnico-científicas sobre o Semiárido brasileiro. Campina Grande: INSA,)2023). Disponível em: https://www.insa.gov.br. Acesso em: 2 ago. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022.

KANG, M. S.; HEO, I.; PARK, S. H.; BAE, J.; KIM, S.; KIM, G.; KIM, B.-H.; JEONG, N. C.; YOO, W. C. Time-efficient atmospheric water harvesting using Fluorophenyl oligomer incorporated MOFs. Nature Communications, v. 15, art. 1782, 2024. DOI: 10.1038/s41467-024-53853-7.

KILIÇ, Z. The Importance of Water and Conscious Use of Water. International Journal of Hydrology, v. 4, n. 4, p. 239–241, 2020. DOI: 10.15406/ijh.2020.04.00220.

KIM, H.; RAO, S. R.; JIANG, X.; KURIHARA, K.; YAGHI, O. M.; WANG, E. N. Adsorption-based atmospheric water harvesting device for arid climates. Nature Communications, v. 9, n. 1, p. 5220, 2018. DOI: 10.1038/s41467-018-07722-1.

Kolarik, N.E., Roopsind, A., Pickens, A., Brandt, J.S. A satellite-based monitoring system for quantifying surface water and mesic vegetation dynamics in a semi-arid region. Ecol. Indicat., 147 (2023), Article 109965

Kordesofla, ML; Abna, P. Urban Constructed Wetlands in Arid and Semiarid Zones. Civil and Environmental Engineering, Volume 19 (2023): Issue 1 (June 2023)

KWAN, T. H.; YUAN, S.; SHEN, Y.; PEI, G. Comparative meta-analysis of desalination and atmospheric water harvesting technologies based on the minimum energy of separation. Energy Reports, v. 8, p. 10072–10087, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.175

LETRAS AMBIENTAIS. Laboratório cria geotecnologia para captar água da chuva nas áreas em desertificação no semiárido. 2023. Disponível em: https://www.letrasambientais.org.br/posts/laboratorio-cria-geotecnologia-para-captar-agua-da-chuva-nas-areas-em-desertificacao-no-semiarido. Acesso em: 2 ago. 2025.

LI, J.; YAO, Z.; LIU, X.; YANG, C.; LIU, P.; LIU, P.; WANG, W.; GUO, H.; HUANG, G.; JIN, X.; LEI, Z. Modified metal-organic framework-based polymer materials for atmospheric water harvesting and liquid water storage. Surface Interfaces, v. 45, artigo 105651, 2024. DOI: 10.1016/j.surfin.2024.105651.

LIMA, A. F. B., FERREIRA, J. B., MOREIRA, J. G. C., NASCIMENTO, L. O., SANTOS, D. M., SANTOS, V. B., ARAÚJO, D. R., 2023. Vista do Distribuição espaço-temporal das anomalias de precipitação pluviométrica no Acre. Revista Brasileira de Geografia Física 16(2), 741–754.

LIU, C.-H.; XU, L.; WANG, Z.-Y.; HAN, S.-J.; FU, M.-L.; YUAN, B. Green Synthesis of Polyurethane Sponge-Grafted Calcium Alginate with Carbon Ink Aerogel with High Water Vapor Harvesting Capacity for Solar-Driven All-Weather Atmospheric Water Harvesting. Langmuir, v. 40, n. 24, p. 9799–9809, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c01119.

LOPES, Jessica Rafaelly Almeida; BEZERRA, Joel Medeiros; ALMEIDA, Natália Maria Diniz Pereira; GONÇALVES, Gustavo Leite; MENDONÇA, Sarah de Souza Cruz. Águas subterrâneas como alternativa de subsistência em uma comunidade rural no semiárido

brasileiro. Águas Subterrâneas, v. 34, n. 2, 2020. Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas. DOI: 10.14295/ras.v34i2.29889.

LOVIS, F.; COSTA, R. F.; PEREIRA, J. L.; BARROS, M. A. S. D.; LIMA, T. C. P.; MENEZES, M. L.; SOARES, D. A. S.; SANTOS, M. N. M. C. S. D. Multicycle sorption–desorption atmospheric water harvesting devices: evaluation of materials and energy sources. Desalination, v. 565, p. 117934, 2024. DOI: 10.1016/j.desal.2023.117934.

LU, H.; SHI, W.; GUO, Y.; GUAN, W.; LEI, C.; YU, G. Materials engineering for atmospheric water harvesting: progress and perspectives. Advanced Materials, v. 34, n. 12, p. 2110079, 2022. DOI: 10.1002/adma.202110079.
LU, K.; LIU, C.; LIU, J.; HE, Y.; TIAN, X.; LIU, Z.; CAO, Y.; SHEN, Y.; HUANG, W.; ZHANG, K. Hierarchical Natural Pollen Cell-Derived Composite Sorbents for Efficient Atmospheric Water Harvesting. ACS Applied Materials & Interfaces, v. 14, n. 24, p. 27910–27919, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acsami.2c04845.

LUCENA, C. Y. S.; NASCIMENTO, F. D.; CUNHA, F. V. O reuso de águas residuais como meio de convivência com a seca no semiárido do Nordeste Brasileiro. REGNE, v. 4, p. 1-17, 2018.

MAGALHÃES, A. R.; GLANTZ, E. M. H. (Ed.). Socioeconomic impacts of climate variations and policy responses in Brazil, Brasília, DF: Fundação Grupo Esquel Brasil, 1992. 156 p.

MAGRINI, A.; CATTANI, L.; CARTESAGNA, M.; MAGNANI, L. Water production from air conditioning systems: some evaluations about a sustainable use of resources. Sustainability, v. 9, n. 8, p. 1309, 2017. DOI: 10.3390/su9081309.

MAITY, D.; TEIXEIRA, A. P.; FUSSENEGGER, M. Hydratable Core–Shell Polymer Networks for Atmospheric Water Harvesting Powered by Sunlight. Small, v. 19, n. 26, p. 2301427, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1002/smll.202301427.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; NOBRE, P.; SAMPAIO, G. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In: MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. O.; PAZ, V. P. da S. (Eds.). Recursos Hídricos em Regiões Áridas e Semiáridas. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido – INSA, 2011. p. 381–392.

MATA, Djair Alves da. Gestão dos recursos hídricos: desafios e possibilidades de viver no semiárido. In: IV SUSTENTARE – Workshop Internacional em Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos; VII WIPIS – Workshop Internacional de Planejamento e Indicadores de Sustentabilidade; XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE – SRHNE, 2020, Evento on-line. Anais... Porto Alegre: ABRHidro, 2020.

MENDOZA-ESCAMILLA, J. A.; HERNANDEZ-RANGEL, F. J.; CRUZ-ALCÁNTAR, P.; SAAVEDRA-LEOS, M. Z.; MORALES-MORALES, J.; FIGUEROA-DÍAZ, R. A.; VALENCIA-CASTILLO, C. M.; MARTINEZ-LÓPEZ, F. J. A feasibility study on the use of an atmospheric water generator (AWG) for the harvesting of fresh water in a semi-arid region affected by mining pollution. Applied Sciences, v. 9, n. 16, art. 3278, ago. 2019. DOI: 10.3390/app9163278

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). MDR implementou 1.068 sistemas de dessalinização em 298 municípios do semiárido brasileiro em 2024. 2025b. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/midr-implementou-1-068-sistemas-de-dessalinizacao-em-298-municipios-do-semiarido-brasileiro-em-2024. Acesso em: 2 ago. 2025.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). Programa Água Doce entrega 110 novos sistemas de dessalinização no Semiárido em 2025. 2025a. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/programa-agua-doce-entrega-110-novos-sistemas-de-dessalinizacao-no-semiarido-em-2025. Acesso em: 2 ago. 2025.

MORALES, N.; ANTÔNELLO, S. L. Gestão das águas subterrâneas com uso de ferramentas de geoprocessamento. Revista Ciência em Extensão, São Paulo, v. 1, p. 167, 2004. Suplemento.

MOURA, M. S. B. de; SOUZA, L. S. B. de; SANTOS, C. A. dos; SILVA, T. G. F. da; SANTOS, D. C. dos; SANTOS, M. A. L. dos. Aspectos meteorológicos do Semiárido brasileiro. Petrolina: Repositório Embrapa, cap. 2, p. 85-104, 2019.

MOURA, M. S. B; GALVINCIO, J. D; BRITO, L. T. de L; SOUZA, L. S. B; SÁ, I. I. S; SILVA, T. G. F. Clima e água de chuva no Semi-Árido. Repositório Alice, Embrapa, cap. 2, p. 37-59, 2007.

NOVAIS, G. T; MACHADO, L. A. Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais. Revista Brasileira de Climatologia, v. 32, p. 1–39, 10 jan. 2023.

OLIVEROS-VILLANUEVA, R.; VELEZ, J. C.; GONZALEZ-QUIROGA, A. Enhancing Water Security in La Guajira, Colombia, through Atmospheric Water Harvesting. 2023 IEEE Colombian Caribbean Conference (C3). DOI: 10.1109/C358072.2023.10436126.

PIMENTA, B; BELTRÃO, N.E.S; GEMAQUE, A.M.S; TAVARES, P.A. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. Interações (Campo Grande), p. 407–420, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/inter/a/czmJyn93szNcX5jfXjpPR8M/?format=pdf&lang=pt>.

PINHEIRO, G. M.; AMORIM, M. C. C. T. Uma contribuição ao estudo da temperatura e da umidade relativa do ar em Euclides da Cunha Paulista/SP. Geografia em Atos, Presidente Prudente, v. 2, n. 7, p. 59–70, 2007.

POKHAREL, S. Water use opportunities and conflicts in a small watershed- a case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Oxford, v. 11, n. 6, p. 1288- 1299, Aug. 2007.

RÊGO, T. C. C. C. Proposta metodológica para gestão desecas: o caso da Bacia do Alto Jaguaribe, Ceará. 2008. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

REVISTA PESQUISA FAPESP. Aquecimento global faz surgir primeira zona árida e expande clima semiárido e áreas secas no Brasil. Revista Pesquisa Fapesp, 2024. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/aquecimento-global-faz-surgir-primeira-zona-arida-e-expande-clima-semiarido-e-areas-secas-no-brasil/. Acesso em: 04 jun. 2025.

Rohli, R. V., Joyner, T. A., Reynolds, S. J., & Ballinger, T. J. (2015). Overlap of global Köppen–Geiger climates, biomes, and soil orders. Physical Geography, 36(2), 158–175. https://doi-org.ez87.periodicos.capes.gov.br/10.1080/02723646.2015.1016384

ROOY, M. P. V., 1965. A Rainfall Anomaly Index (RAI), Independent of the Time and Space. Notos 14, 43–48.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. Mathematical Modelling, v. 9, n. 3-5, p. 161-76, 1987. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025587904738.

SALEHI, Ali Akbar; GHANNADI-MARAGHEH, Mohammad; TORAB-MOSTAEDI, Meisam; TORKAMAN, Rezvan; ASADOLLAHZADEH, Mehdi. A review on the water-energy nexus for drinking water production from humid air. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 120, 109627, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109627.

SANTOS, C. C. O Semiárido Brasileiro e suas Especificidades. Atena Editora.Ponta Grossa - PR, 2019.

SANTOS, R. N. M. DOS. Produção científica: por que medir? o que medir? Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação, v. 1, n. 1, p. 22–38, 2003.

SEYAM, S. Energy and Exergy Analysis of Refrigeration Systems. Low-Temp. Technol. 2019.

SHAN, H.; LI, C.; CHEN, Z.; YING, W.; POREDOŠ, P.; YE, Z.; PAN, Q.; WANG, J.; WANG, R. Exceptional water production yield enabled by batch-processed portable water harvester in semi-arid climate. Nature Communications, v. 13, n. 5406, 2022. DOI: 10.1038/s41467-022-33062-w.

SHAO, Z.; LV, H.; POREDOŠ, P.; SU, S.; SUN, R.; WANG, H.; DU, S.; WANG, R. Scaled solar-driven atmospheric water harvester with low-cost composite sorbent. Energy, v. 302, art. 131917, ago. 2024. DOI: 10.1016/j.energy.2024.131917.

SILVA, B. C. O. et al., Os paradigmas da seca no semiárido brasileiro: das políticas de combate à concepção de convivência com o fenômeno. In: CONIDIS: CONGRESSO INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO. Anais..., Paraíba, 2016.

SILVA, L, A, P; SILVA, C, R; SOUZA, C, M, P; BOLFE, E, L; SOUZA, J, P, S; LEITE, M, E. Mapping of aridity and its connections with climate classes and climate desertification in future scenarios – Brazilian semi-arid region. Sociedade e Natureza, Vol. 35 No. 1 (2023). https://doi.org/10.14393/SN-v35-2023-67666

SILVA, L. C. C. Captação de água da atmosfera – análise do potencial brasileiro e desenvolvimento de protótipos. Viçosa, MG, 2018.

SOARES, Rogério Barbosa; CAMPOS, Kilmer Coelho. Uso e disponibilidade hídrica no semiárido do Brasil. Revista de Política Agrícola, Brasília, V. 3, n. 3, p. 48-57, 2013.

SOBRAL, M. C.; LINS, R. C.; LIMA, S. C.; SALES, J. C. S. Diagnóstico dos comitês de bacia do semiárido brasileiro. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 16, n. 1, p. 103-115, 2011. DOI: 10.21168/rbrh.v16n1.p103-115.

SOUZA, D. B. Escassez hídrica, um futuro não tão distante: promovendo ações para o uso sustentável da água em maricá. Instituto de Ciência, Tecnologia e Inovação de Maricá (ICTIM), 2022.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE (SUDENE). Delimitação da região semiárida brasileira. Recife: SUDENE, [s.d.]. Disponível em: https://www.gov.br/sudene. Acesso em: 2 ago. 2024.

TAO, G.; CHEN, X.; WANG, Y.; DING, Z.; WANG, D.; WANG, J.; DING, J.; WANG, X.; CHENG, Z.; CHENG, L. Metal organic frameworks for atmospheric water harvesting in desert environments: A comparative study. Journal of Cleaner Production, v. 419, 138296, 2023.

TASHTOUSH, B.; ALSHOUBAKI, A. Atmospheric water harvesting: A review of techniques, performance, renewable energy solutions, and feasibility. Energy, v. 280, 128186, 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128186.

TERZIS, A.; RAMACHANDRAN, A.; WANG, K.; ASHEGHI, M.; GOODSON, K. E.; SANTIAGO, J. G. High-Frequency Water Vapor Sorption Cycling Using Fluidization of Metal-Organic Framework. Cell Reports Physical Science, v. 1, n. 2, p. 100057, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100057.

TU, R.; HWANG, Y. Reviews of atmospheric water harvesting technologies. Energy, v. 201, p. 117630, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117630.

TUNDISI, José Galizia. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. Estudos Avançados, v. 22, n. 63, p. 7–16, 2008. https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200002.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). Global Environment Outlook 6: Healthy Planet, Healthy People. Nairobi: UNEP, 2019. Disponível em: https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6. Acesso em: 20 jul. 2025.

WANG, X.; MA, G.; CUI, S.; SUN, K.; LI, W.; PENG, H. High Solar-Thermal Conversion Aerogel for Efficient Atmospheric Water Harvesting. Small, v. 19, n. 37, art. 2307416, 2023. DOI: 10.1002/smll.202307416.

XU, X.; LIU, W.; XIAN, T.; FOROUGHI, F.; ZHOU, S.; DING, J. Nanoporous Silica Lattice Coated with LiCl@PHEA for Continuous Water Harvesting from Atmospheric Humidity. Advanced Functional Materials, v. 34, n. 21, artigo 2402671, 2024. DOI: 10.1002/adfm.202402671.

YAN, Jian; LI, Wenjia; YU, Yingyin; HUANG, Guangyu; PENG, Junjie; LV, Daofei; CHEN, Xin; WANG, Xun; LIU, Zewei. A Polyzwitterionic@MOF Hydrogel with Exceptionally High Water Vapor Uptake for Efficient Atmospheric Water Harvesting. Molecules, v. 29, n. 8, art. 1851, 18 abr. 2024. DOI: 10.3390/molecules29081851

YAO, W.; ZHU, X.; XU, Z.; DAVIS, R. A.; LIU, G.; ZHONG, H.; LIN, X.; DONG, P.; YE, M.; SHEN, J. Loofah Sponge-Derived Hygroscopic Photothermal Absorber for All-Weather Atmospheric Water Harvesting. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022. DOI: https://doi.org/10.1021/acsami.1c20576.

YOUNG, C. E. F.; Costa, L. A. N.; Fares, L. R. Drought in the Brazilian Semi-Arid. 2019. Fundo Internacional para o Desenvolvimento Agrícola.

ZHANG, M; LIU, R; LI, Y. Diversifying Water Sources with Atmospheric Water Harvesting to Enhance Water Supply Resilience. Sustainability, 2022.

ZHANG, X.; QU, H.; LI, X.; ZHANG, L.; ZHANG, Y.; YANG, J.; ZHOU, M.; SURESH, L.; LIU, S.; TAN, S. C. Autonomous Atmospheric Water Harvesting over a Wide RH Range Enabled by Super Hygroscopic Composite Aerogels. Advanced Materials, v. 36, n. 41, p. e2310219, 15 abr. 2024.

ZHAO, F.; ZHOU, X.; LIU, Y.; SHI, Y.; DAI, Y.; YU, G. Super moisture-absorbent gels for all-weather atmospheric water harvesting. Advanced Materials, v. 31, n. 10, p. 1806446, 2019. DOI: 10.1002/adma.201806446.

ZHOU, H.; YAN, L.; TANG, D.; XU, T.; DAI, L.; LI, C.; CHEN, W.; SI, C. Solar-Driven Drum-Type Atmospheric Water Harvester Based on Bio-Based Gels with Fast Adsorption/Desorption Kinetics. Advanced Materials, v. 36, n. 32, art. e2403876, ago. 2024. DOI: 10.1002/adma.202403876.

ZHOU, X.; LU, H.; ZHAO, F.; YU, G. Atmospheric water harvesting: a review of material and structural designs. ACS Materials Letters, v. 2, n. 7, p. 671–684, 2020. DOI: 10.1021/acsmaterialslett.0c00130.