

Análise dos modelos de estimativa de precipitação utilizando séries temporais: Uma análise bibliométrica

Jessica Almeida Monteiro Arruda

Mestrado em Ciências Ambientais

Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana

E-mail: jamarruda@uefs.br

Rodrigo Nogueira de Vasconcelos

Doutor em Ecologia

Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana

E-mail: rnvuefsppgm@gmail.com

Rosângela Leal Santos

Doutora em Engenharia de Transportes

Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana

E-mail: rosaleal@uefs.br

RESUMO

Este estudo realiza uma análise bibliométrica sobre os modelos de estimativa de precipitação utilizando séries temporais, com o objetivo de identificar tendências, métodos e contribuições científicas ao longo das últimas quatro décadas. A pesquisa justifica-se pela importância da precipitação como variável primordial na modelagem hidrológica e pela escassez de dados pluviométricos precisos, especialmente em regiões com alta variabilidade espacial e temporal. O trabalho busca mapear os principais modelos de estimativa de precipitação, analisar sua resolução espacial e temporal, e identificar as tendências metodológicas e inovações na área. A metodologia adotada incluiu uma abordagem bibliométrica, utilizando a base de dados Scopus para coleta de artigos científicos, seguida de análises estatísticas e de redes de coocorrência de termos com o auxílio do software VOSviewer. Foram analisados 78 artigos publicados entre 1982 e 2023, com foco nos 40% mais citados de cada década. Os resultados revelam uma evolução significativa na modelagem da precipitação, com a transição de métodos estatísticos simples para técnicas avançadas, como redes neurais artificiais (ANN) e deep learning (LSTM). A resolução temporal diária e espacial regional predominou nos estudos, e a integração de dados de satélites e técnicas de inteligência artificial (IA) tornou-se uma tendência dominante na última década. Conclui-se que os avanços na modelagem da precipitação têm impactos práticos significativos na gestão de recursos hídricos e na agricultura, contribuindo para a previsão de eventos extremos e a adaptação às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Precipitação. Séries Temporais. Modelagem Hidrológica. Análise Bibliométrica. Inteligência Artificial. Mudanças Climáticas.

1 INTRODUÇÃO

A compreensão dos fenômenos hidrológicos é essencial para a modelagem chuva-vazão, na qual a precipitação se destaca como variável de entrada primordial. Entretanto, a dificuldade em obter dados pluviométricos precisos compromete a representação realista dos eventos hidrológicos, sobretudo em bacias onde a alta variabilidade espacial e as falhas nos registros podem resultar em discrepâncias significativas

entre o modelo e a realidade. Estudos como o de Arai *et al.* (2009) demonstram a relevância da precipitação na caracterização do clima regional e seu impacto direto na agropecuária, enquanto Silva *et al.* (2011) evidenciam que períodos prolongados de seca afetam a agricultura e reduzem os níveis de água em rios, reservatórios e mananciais, impactando inclusive a geração de energia hidrelétrica. Lucena *et al.* (2008) complementa essa visão, ressaltando que a intensidade pluviométrica é influenciada por fenômenos atmosféricos e oceânicos em larga escala.

No contexto brasileiro, a rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) enfrenta desafios devido à distribuição limitada das estações e inconsistências nas séries históricas, oriundas de problemas técnicos e de processamento de dados. Para mitigar tais desafios, técnicas como a regressão linear múltipla têm se mostrado eficazes para ajustar e preencher lacunas em dados históricos (Pedro Júnior *et al.*, 1994), e metodologias baseadas em análise de regressão múltipla correlacionam a precipitação com variáveis fisiográficas e temporais (Antonini *et al.*, 2019). Diante da escassez de dados pluviométricos e da complexidade inerente à modelagem da precipitação, torna-se imprescindível identificar quais são os principais modelos utilizados, bem como a resolução espacial e temporal (horária, diária, mensal ou outra periodicidade) desses modelos, além de compreender as tendências e inovações metodológicas ao longo das décadas.

A análise bibliométrica surge, neste cenário, como uma ferramenta robusta que utiliza técnicas estatísticas e matemáticas para mapear a produtividade científica e identificar padrões autorais, institucionais e temáticos (Wu, 2017; Guedes & Borshiver, 2005; Café & Brascher, 2008; Job, 2018). Assim, este estudo propõe integrar a modelagem da precipitação com uma abordagem bibliométrica e de rede, objetivando identificar os principais modelos de estimativa de precipitação a partir de séries temporais, analisar a resolução e periodicidade desses modelos, mapear os principais pesquisadores e instituições da área, e avaliar os métodos mais empregados na calibração e validação dos modelos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CLIMA

Clima é o conjunto de fenômenos meteorológicos que caracterizam o estado médio da atmosfera sobre determinado lugar da superfície terrestre. (HANN, 1882 apud MONTEIRO, 1991). Através desta definição é possível entender a ideia central do que seria climatologia.

É de extrema importância entender que clima e tempo não são iguais, e sendo assim, possuem algumas diferenças. O Tempo é entendido como um conjunto de elementos estudados que expressa as condições da atmosfera observadas em um momento atual, ou seja, em um instante da atmosfera. Já o Clima terá seu entendimento associado a um conjunto de elementos estudados através de registros, deixados ao longo de anos e anos.

Segundo Borsato (2000), os elementos climáticos em algum local da superfície da terra, podem ser definidos como: temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, nebulosidade, radiação solar, poeiras, direção e velocidade dos ventos, campo elétrico, tensão do vapor de água, íons positivos e negativos, visibilidade horizontal e corrente elétrica vertical, agindo de uma forma simultânea e em conjunto, considerados como propriedade específica da atuação de cada massa de ar.

2.1.1 Componentes Climáticos

Segundo Silva (2001), o estudo do clima e conhecimento da sua origem nos levam ao entendimento relacionado a fatores que podem ser definidos como: genéricos e modificadores.

Segundo Vecchia (2001) os elementos do clima são: temperatura do ar, umidade do ar, pressão atmosférica, sentido e velocidade dos ventos, nebulosidade e precipitações atmosféricas, ou seja, inclui não só fenômenos meteorológicos, mas também fenômenos que são influenciados pelas condições do local

2.1.1.1 Fatores genéricos

São fatores dinâmicos que condicionam o clima, esses fenômenos meteorológicos têm origem na radiação solar e nas movimentações atmosféricas e marítimas, são definidos:

- Radiação solar: é o fator que promove os processos de trocas térmicas globais em função do aquecimento da superfície da Terra. (CARLETTO, 2005)
- Circulação geral da atmosfera: combina as forças térmicas, cuja circulação é meridiana, ou seja, na direção norte-sul e as forças dinâmicas que são provocadas pela rotação da terra e que promove uma modificação no fluxo de ar que tende a criar uma circulação zonal, sentido Leste-Oeste, segundo Vecchia (2001).
- Correntes marítimas: transferem calor das regiões com diferença de temperatura. Atuam de duas maneiras sobretudo: aumentando a pressão de vapor d'água, ou seja, a umidade do ar, e modificando o regime dos ventos, segundo Vecchia (2001).

2.1.1.2 Fatores modificadores

São os fatores estáticos que atuam sobre o clima e criam variações locais, são eles: geográficos, topológicos, biológicos e culturais. Na maior parte das vezes, as variações causadas por esses fatores assumem grandes magnitudes. Vecchia (2001) resume os principais fatores modificadores por ordem decrescente de magnitude:

- Geográficos: latitude, altitude e relação entre as massas de terra e água.
- Topográficos: elevação, orientação do sol e estrutura do solo.
- Biológicos: fauna e flora.

- Culturais: alterações no solo, poluição da atmosfera e modificações hidrológicas.

Os elementos e sobretudo os fatores do clima são por vezes tão complexos e variáveis, altamente dinâmicos, por vezes com comportamentos caóticos, que torna impossível definir o seu funcionamento preciso.

2.2 PRECIPITAÇÃO

A precipitação, conforme definida por Bertoni e Tucci (2009), consiste em toda água proveniente da atmosfera que atinge a superfície terrestre, independentemente de seu estado físico, como garoa, chuva, neve, granizo, saraiva, geada ou orvalho. No Brasil, aproximadamente 99% da precipitação ocorre na forma de chuva, enquanto menos de 1% se manifesta nas demais formas (Santos *et al.*, 2001). A precipitação pluviométrica é um elemento climático amplamente estudado, especialmente devido aos registros meteorológicos e hidrológicos, que em algumas regiões remontam ao início do século XX (Cavalcanti *et al.*, 2009).

As nuvens, que possibilitam a ocorrência de precipitação sob condições específicas, são formadas pela mistura de ar, vapor de água e gotículas líquidas ou sólidas, cujos diâmetros variam entre 0,001 e 0,03 mm (Bertoni e Tucci, 2013). As principais características da precipitação incluem sua duração, volume total precipitado, distribuição temporal e espacial. Em termos de processos hidrometeorológicos, a precipitação pluvial é o elemento que apresenta maior variabilidade mensal e anual quando comparada entre diferentes regiões.

Segundo Bertoni e Tucci (2013), a formação da precipitação está associada ao movimento ascendente de massas de ar úmido, o que provoca um resfriamento dinâmico ou adiabático, levando o vapor de água a atingir seu ponto de saturação. A partir do nível de condensação, em condições favoráveis e na presença de núcleos higroscópicos, o vapor d'água condensa, formando minúsculas gotículas em torno desses núcleos. Para que as gotas de água precipitem, é necessário que atinjam um volume tal que seu peso supere as forças que as mantêm em suspensão, adquirindo, assim, uma velocidade de queda superior aos componentes verticais ascendentes dos movimentos atmosféricos. As gotas de chuva possuem diâmetros que variam de 0,5 a 2,0 mm, podendo atingir valores máximos de 5,0 a 5,5 mm. Quando uma gota atinge um diâmetro de 7,00 mm, sua velocidade de queda alcança aproximadamente 9 m/s, momento em que ocorre sua deformação e subsequente fragmentação em gotas menores devido à resistência do ar (Bertoni e Tucci, 2009).

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi implementada uma abordagem metodológica unificada, de

análise bibliométrica proporcionando maior robustez ao estudo. O Quadro 1 apresenta a relação entre as questões de pesquisa, as análises propostas em nossa abordagem metodológica e os dados utilizados para sua execução. O quadro está estruturado em três campos principais: as questões de interesse, a análise empregada para respondê-las e o tipo de dados utilizados.

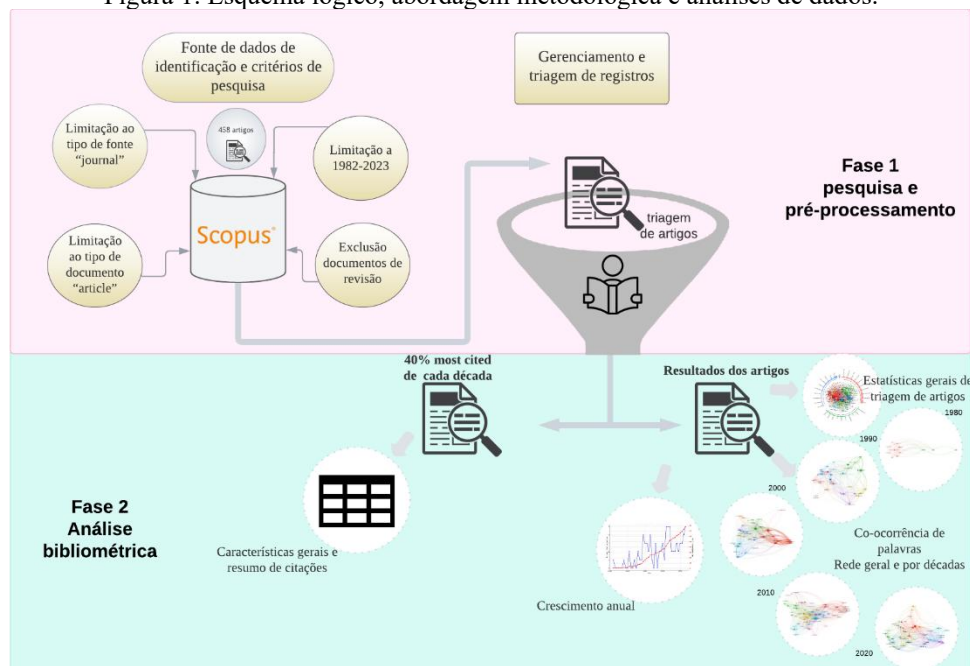
Quadro 1. Descrição da relação entre questões de trabalho, análises e fontes de dados

Perguntas	Análise	Dados
Quais são as tendências das publicações sobre modelos de precipitação utilizando séries temporais?	Estatísticas gerais/Rede de coocorrência de palavras/Rede espacial de coautoria	Todos os papers
Quais países mais contribuíram para a pesquisa sobre modelos de precipitação utilizando séries temporais?	Estatísticas gerais/Rede de coocorrência de palavras/Rede espacial de coautoria	Todos os papers
Os artigos especificam a área geográfica abrangida pelo modelo de precipitação e a resolução espacial e/ou temporal do modelo?	Métricas	40% mais citados
As pesquisas identificam as variáveis climáticas e meteorológicas relevantes que afetam a precipitação e as fontes de dados utilizadas para fornecer essas variáveis?	Métricas	40% mais citados
Os estudos consideram diferentes tipos de precipitação e os processos físicos e meteorológicos no modelo de precipitação?	Métricas	40% mais citados
Os estudos apresentam os métodos mais utilizados para calibração e validação de modelos de precipitação e quais são esses métodos?	Métricas	40% mais citados
Como os avanços na modelagem de precipitação podem impactar a gestão de recursos hídricos e a agricultura?	Estatísticas gerais/características gerais	40% mais citados
Quais são as tendências emergentes na modelagem de precipitação e de que forma a inteligência artificial e o aprendizado de máquina estão sendo integrados aos modelos de precipitação?	Características gerais	40% mais citados
Quais são as publicações mais influentes sobre modelos de precipitação utilizando séries temporais?	Estatísticas gerais/Rede de coocorrência de palavras/Rede espacial de coautoria	40% mais citados

Fonte: Elaborado pelos autores.

A abordagem e os passos metodológicos utilizados estão ilustrados na Figura 1, que envolve a escolha da base de dados de pesquisa, a identificação de termos relevantes ao tema e a aplicação de filtros no mecanismo de busca. Em seguida, foi realizada uma triagem manual, com a leitura dos títulos e resumos dos artigos recuperados, a fim de identificar e excluir aqueles que não se alinhavam aos objetivos da pesquisa, caracterizando a Fase 1 da pesquisa. Posteriormente, foram feitas as análises para dois conjuntos de dados: todos os artigos selecionados, um total equivalente a 78 artigos e para os 40% mais citados de cada década.

Figura 1. Esquema lógico, abordagem metodológica e análises de dados.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3.1 BASE DA DADOS

A seleção da base de dados Scopus para a coleta de dados bibliométricos justifica-se pela sua abrangência e qualidade, sendo reconhecida como uma das maiores bases multidisciplinares globais. A Scopus disponibiliza acesso a mais de 27.800 periódicos revisados por pares e mais de 330.000 livros, além de anais de conferências, garantindo uma cobertura extensa e confiável de informações científicas (ELSEVIER, 2024). Suas ferramentas avançadas de análise e recuperação de dados permitem a identificação de tendências, padrões de citação e redes de colaboração, aspectos essenciais para o mapeamento do conhecimento científico.

No presente estudo, a Scopus é particularmente relevante para a análise de modelos de estimativa de precipitação baseados em séries temporais, pois facilita a recuperação de artigos que abordam a validação de modelos e metodologias específicas. A restrição da busca a artigos publicados em periódicos visa assegurar a originalidade e robustez dos dados, evitando duplicações comuns em resenhas, capítulos de livros ou anais de conferências. Essa rigorosidade na seleção de fontes reflete a necessidade de uma base consolidada e confiável para análises bibliométricas detalhadas, reforçando a escolha da Scopus como fonte primária.

A utilização da Scopus, com suas ferramentas robustas para exportação e análise de dados em múltiplos formatos, contribui significativamente para estudos bibliométricos. Tais estudos permitem compreender a evolução científica em áreas específicas, identificar lacunas na literatura e orientar futuras pesquisas e o desenvolvimento de novas metodologias, destacando-se como um recurso essencial para a pesquisa acadêmica.

3.2 ESTRATÉGIA DE PESQUISA E REGISTO DE TRIAGEM

A estratégia de pesquisa utilizada na base de dados Scopus focou na análise de modelos de estimativa de precipitação e análise das séries temporais, levando em consideração seus métodos de validação. Para a construção do conjunto de dados, a pesquisa foi estruturada utilizando operadores booleanos, como OR e AND, o que permitiu combinar diferentes termos e sinônimos para refinar os resultados e incluir apenas os artigos relevantes para o escopo do estudo. Os termos escolhidos, como "Rainfall Estimation Statistic Model*", "Rainfall Data Analysis Model*", "Rainfall Model*", entre outros, visaram identificar as publicações mais significativas na área de modelagem de precipitação. O uso desses operadores booleanos ajudou a selecionar artigos que abordassem séries temporais modeladas e as análises associadas a modelagem matemática, aspectos essenciais para o desenvolvimento científico sobre o tema.

Para estruturar o conjunto de dados, foram utilizados operadores booleanos OR e AND. As palavras-chave empregadas na pesquisa foram selecionadas com o objetivo de identificar aspectos essenciais que contribuam para a compreensão do desenvolvimento científico relacionado à modelagem de precipitação, bem como para identificar lacunas existentes na literatura sobre o tema. Diversos testes preliminares foram conduzidos com diferentes termos e sinônimos até se chegar ao conjunto final de palavras-chave pertinentes ao estudo.

Os termos da equação final: TITLE-ABS-KEY (("Rainfall Model*" OR "Precipitation Model*" OR "Rainfall Estimation Model*" OR "Precipitation Estimation Model*" OR "Rainfall Estimation Statistic Model*" OR "Precipitation Estimation Statistic Model*" OR "Rainfall Data Analysis Model*") AND ("Time Series Analysis*" OR "Time Series*" OR "Temporal Data Analysis" OR "Temporal Data" OR "Rainfall Data Model")) AND PUBYEAR > 1981 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")).

A equação de busca final refinou ainda mais os resultados ao limitar o ano de publicação entre 1982 e 2023 e o tipo de documento a artigos de pesquisa finalizados (artigos revisados por pares), garantindo que os dados coletados fossem de alta qualidade e relevância.

Após essa etapa inicial, os títulos e resumos dos artigos recuperados foram cuidadosamente revisados, excluindo-se aqueles que não estavam alinhados com os objetivos do estudo. Essa abordagem permitiu que a análise bibliométrica fosse baseada em um conjunto de dados robusto e bem definido, que foi posteriormente exportado em formato CSV para análises qualitativas e quantitativas. Essas análises incluíram a distribuição geográfica dos estudos, permitindo uma visão abrangente da evolução e do impacto da pesquisa sobre modelos de precipitação ao longo do tempo (SANTANA *et al.*, 2021).

Esse processo inicial possibilitou a identificação de padrões emergentes e de evolução nos temas de pesquisa ao longo do tempo. Posteriormente, realizou-se uma revisão sistemática detalhada em 40% dos

artigos mais citados de cada período.

Esse estudo, ao integrar uma abordagem quantitativa e qualitativa, não só mapeia o desenvolvimento histórico da área de ciências ambientais, como também destaca as lacunas e oportunidades futuras, reforçando a importância da inovação metodológica e da colaboração internacional na pesquisa científica.

3.3 ANÁLISE SEMÂNTICA E GERAL DA REDE

A construção das redes de termos foi realizada usando o programa VOSviewer, um software elaborado para análise bibliométrica de literatura científica (VAN ECK; WALTMAN, 2010) que utiliza a técnica de mapeamento VOS para a visualização de similaridades e permitir o desenvolvimento de mapas bibliométricos. O software foi utilizado para a confecção de mapas baseados em dados de coocorrências entre os termos. O uso desse software baseou-se na possibilidade do mesmo ser executado em muitas plataformas de hardware, sistemas operacionais, ser gratuito e ainda a possibilidade de ser utilizado diretamente da internet (VAN ECK; WALTMAN, 2010; VAN NUNEN *et al.*, 2018). O número mínimo de ocorrências de uma palavra-chave é de cinco vezes para as décadas e rede geral, para títulos, resumos e palavras-chave de todas as publicações para construir uma rede.

O VOSviewer pode ser usado para construir redes de publicações científicas, revistas científicas, pesquisadores, organizações de pesquisa, países e palavras-chave. Os itens nessas redes podem ser conectados por coautoria, coocorrência, citação, acoplamento bibliográfico ou links de coocitação (VAN ECK; WALTMAN, 2010). Os mapas bibliométricos produzidos no VOSviewer utilizam de princípios relacionados a mineração de texto (VAN ECK; WALTMAN, 2010). A análise das palavras-chave entre títulos e resumos mostra a conexão entre termos relacionados, proporcionando a divisão em grupos denominados clusters, que agrupa todos os termos considerados similares.

O método de contagem para este estudo foi o full counting, correspondente à contagem total, onde cada link de coocorrências tem o mesmo peso, o que significa que todas as ocorrências do termo no documento serão contadas, porém há o binary counting apenas observa a presença ou não do termo existente no documento (VAN ECK; WALTMAN, 2010).

As representações gráficas expressas nos mapas relacionam a proporcionalidade de similaridades e coocorrências de termos nas publicações as redes de coocorrência são compostos de nós e arestas. Na qual os nós são objetos como a coocorrência de palavras e países. Entre qualquer par de nós pode existir uma aresta. Uma aresta é uma ligação ou uma relação entre dois nós. A distância entre dois nós na visualização indica aproximadamente a relação entre os termos pesquisados em termos de coocorrência. O tamanho do nó é determinado pelo peso de um item em determinada rede (VAN ECK; WALTMAN, 2010).

Para a criação dos clusters foi elaborado um arquivo thesaurus, que representa um dicionário de sinônimos no formato txt, onde tem a palavra da forma como está o label e replace by que é a maneira

como é para ficar o termo (WALTMAN; VAN ECK; NOYONS, 2010). O thesaurus é utilizado para realizar a limpeza dos termos, podendo ignorar alguns, excluir, alterar forma de escrita e/ou unificar termos que tem significados semelhantes.

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA REDE

A análise bibliométrica, essencial para compreender o panorama da produção científica em determinadas áreas de estudo, foi conduzida por meio do pacote estatístico Bibliometrix, uma ferramenta de código aberto integrada à linguagem R, amplamente reconhecida por sua versatilidade em análises de dados científicos (ARIA; CUCCURULLO, 2017).

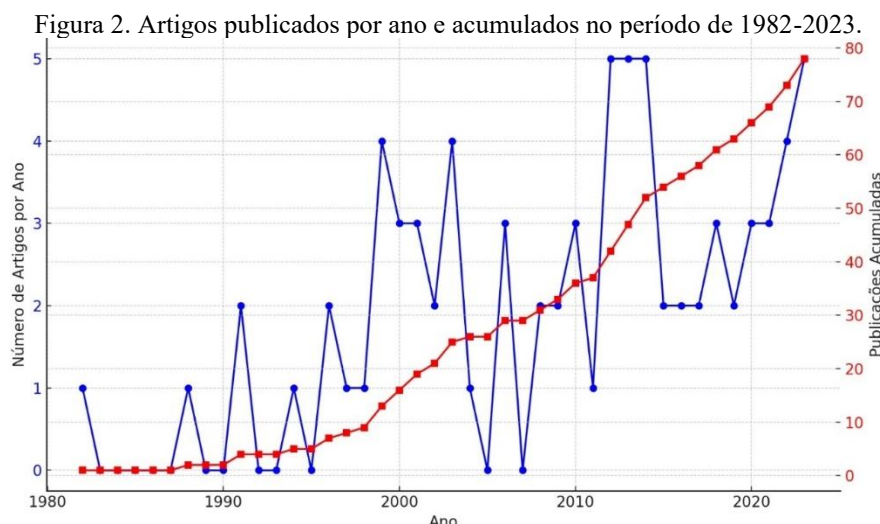
Para o desenvolvimento desta análise, foram implementados no ambiente R Studio os comandos necessários para a instalação e ativação do pacote Bibliometrix. Primeiramente, utilizou-se `install.packages("bibliometrix")` para garantir a instalação do pacote, seguido de `library(bibliometrix)` e `biblioshiny()`, que acionaram a interface gráfica interativa, permitindo a visualização mais intuitiva dos dados. A partir daí, uma base de dados com publicações científicas foi inserida no sistema, e analisaram-se variáveis como a contribuição de diferentes países e a produtividade dos autores, esses dados foram processados e organizados manualmente, utilizando ajustes nos histogramas de frequências para refinar a apresentação dos resultados.

Em suma, a utilização do pacote Bibliometrix no R Studio, com sua ampla gama de recursos para análise e visualização, possibilitou a elaboração de um mapeamento aprofundado da produção científica, permitindo uma melhor compreensão das dinâmicas e tendências do campo em estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PUBLICAÇÕES DAS TENDÊNCIA DA MODELAGEM DA PRECIPITAÇÃO

Após o processamento dos dados bibliográficos e a filtragem manual, a amostra final resultou em 78 artigos publicados entre 1982 e 2023, com uma média de 1,86 artigos por ano e um desvio padrão de 1,59, ou seja, $1,86 \pm 1,59$. Isso indica que, em média, houve aproximadamente 1,86 publicações anuais, com uma variação de 1,59 artigos em torno dessa média. Observou-se ainda um crescimento anual de 4,0%, conforme ilustrado na Figura 2.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Quando avaliado o crescimento anual, os dados indicam um crescimento modesto e irregular na quantidade de artigos publicados entre 1982 e 2023. A análise revela anos com picos de produção, como 1999, 2003, 2012 e 2023, além de períodos sem publicações ou com poucas produções (por exemplo, entre 1983 e 1987). Este comportamento reflete o interesse crescente em modelagem de precipitação à medida que novas tecnologias e dados se tornaram disponíveis, bem como o impacto de eventos globais e regionais.

A modelagem de precipitação, especialmente utilizando técnicas como Krigagem e Análise de Fourier, se beneficiou dos avanços em computação e sensoriamento remoto, como o uso de satélites, que se tornaram mais acessíveis nas últimas décadas. Fatores como a crise climática e a necessidade de prever eventos extremos (inundações e secas) também impulsionaram o crescimento na produção científica a partir dos anos 2000. O aumento da produção pode ser explicado pela necessidade crescente de ferramentas preditivas mais precisas, especialmente em regiões com dados pluviométricos escassos, como a Bahia, por exemplo.

A Tabela 2, mostra uma clara tendência de aumento na quantidade de artigos publicados ao longo do tempo.

Tabela 1. Evolução da quantidade de publicações ao longo das décadas, com percentual, média e desvio padrão.

Década	Publicações Totais	Percentual do Total (%)	Média de Artigos/ano	Desvio Padrão
1982-1989	2	2,56%	0,25	0,43
1990-1999	10	12,82%	1,1	1,22
2000-2009	26	33,33%	2	1,26
2010-2019	36	46,15%	3	1,41
2020-2023	12	15,38%	3,75	0,83

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A Figura 2 e a Tabela 2, evidencia que no que tange ao crescimento das publicações acumuladas tem-se que refletir a consolidação da modelagem de precipitação como uma área de pesquisa importante. O

gráfico acumulado mostra um aumento consistente a partir de 1999, o que coincide com o aumento do acesso a ferramentas tecnológicas como modelos baseados em dados geoespaciais e a utilização de técnicas computacionais avançadas. A partir de 2010, o crescimento acelera, evidenciando o papel fundamental da modelagem para enfrentar os desafios climáticos contemporâneos, como variações extremas de precipitação, mudanças nos padrões de chuva e a gestão sustentável de recursos hídricos.

Quando a análise é realizada por décadas, têm-se que, de na década de 80 (1982-1989) foram realizadas 2 publicações, correspondendo a 2,56% do total. Este período apresenta uma baixa quantidade de artigos, refletindo o estágio inicial da pesquisa em modelagem de precipitação. Na década de 90 (1990-1999) tivemos 10 publicações, representando 12,82% do total. A década de 1990 marca o início de um aumento mais significativo no interesse pela modelagem climática, possivelmente impulsionado pela crescente preocupação com o impacto das mudanças climáticas. Na década de 2000 (2000-2009) houve 26 publicações, representando 33,33% do total. Esta década registra um aumento notável na produção científica, o que pode ser associado ao surgimento de tecnologias de sensoriamento remoto, modelos climáticos mais sofisticados e a ampla utilização de dados meteorológicos de satélites. De 2010-2019, década de 2010, 36 publicações, correspondendo a 46,15% do total. Este período consolida a modelagem de precipitação como uma área de pesquisa madura, com o uso intensivo de big data, inteligência artificial, e o desenvolvimento de técnicas de modelagem preditiva mais avançadas, como Krigagem e análise espectral. E por fim, a década ainda em formação, de 2020-2023, já se tem 12 publicações até o momento, representando 15,38% do total. Mesmo com menos anos, a produção continua a crescer, refletindo a relevância cada vez maior da modelagem de precipitação, especialmente em resposta a eventos climáticos extremos e a necessidade de prever com mais precisão os impactos da mudança climática.

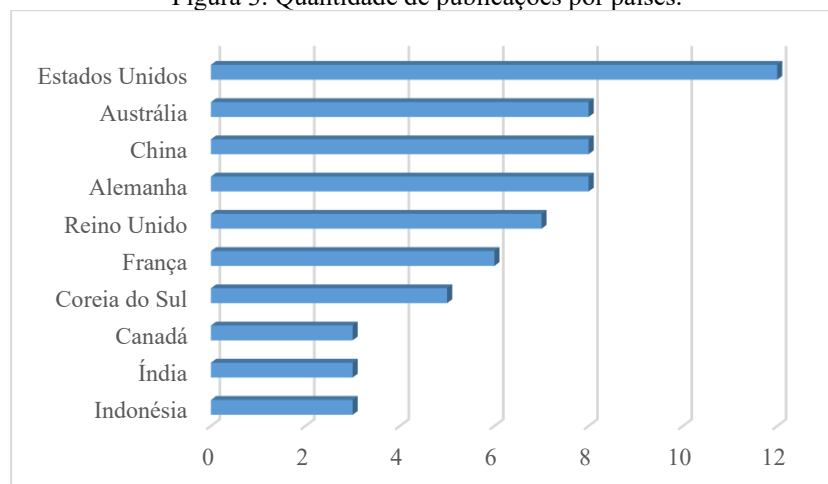
Ainda analisando a Figura 2, é possível observar que os picos e quedas nas publicações podem ser justificados por fatores tecnológicos e eventos globais. O pico de 1999 pode estar relacionado ao aumento do interesse pela modelagem de precipitação devido ao Protocolo de Quioto e à crescente preocupação com mudanças climáticas. Nos anos 2000, o uso de satélites e técnicas como Krigagem impulsionou as publicações. Entre 2012 e 2013, o uso de big data e inteligência artificial ampliou ainda mais o interesse no campo. A queda relativa em 2020-2023 pode ter sido influenciada pela pandemia de COVID-19, que impactou a produção científica global, embora o interesse tenha permanecido alto devido à relevância do tema. Dados estes que justificam a média e o desvio padrão apresentados na Tabela 2.

4.2 PAÍSES CONTRIBUÍRAM PARA A PESQUISA SOBRE A MODELAGEM DA PRECIPITAÇÃO

Construiu-se uma rede bibliométrica para visualizar as redes de colaboração e a distribuição das publicações em todo o mundo relativas à aplicação sobre modelagem da precipitação. A Figura 3, mostra como ficaram distribuídas as quantidades de publicações entre os 10 países com maior número de

publicações na área em questão.

Figura 3. Quantidade de publicações por países.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Os Estados Unidos ocupam o primeiro lugar, com um total de 30 publicações e o Brasil ocupa a nona posição no ranking global da distribuição geográfica das produções científicas relativo ao número de citações por países e a Tabela 3 mostra o percentual de cada país.

Tabela 2. Quantidade de artigos publicados e percentuais.

Países	Frequência	Percentual (%)
Estados Unidos	30	12,66
Reino Unido	26	10,97
Austrália	22	9,28
França	19	8,02
China	18	7,59
Alemanha	14	5,91
Indonésia	11	4,64
Coreia do Sul	10	4,22
Brasil	6	2,53
Equador	5	2,11

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

4.3 ÁREA GEOGRÁFICA E A RESOLUÇÃO

A análise dos 32 artigos revela que todos eles (100%) especificam a área geográfica abrangida pelo modelo de precipitação e a resolução espacial e/ou temporal do modelo. Isso indica que a comunidade científica tem um consenso sobre a importância de definir claramente a abrangência e a resolução dos modelos de precipitação.

Em relação à resolução temporal, a mais comum é a diária, presente em 90,6% dos artigos. A resolução horária aparece em apenas 3,1% dos casos, enquanto a combinação de resolução diária e mensal é observada em 6,3% dos artigos. Isso sugere que a resolução diária é a preferida na maioria dos estudos, provavelmente devido ao seu equilíbrio entre detalhamento e viabilidade computacional.

No que diz respeito à resolução espacial, a mais frequente é a regional, presente em 93,8% dos artigos. A resolução local aparece em apenas 6,2% dos casos, indicando que a maioria dos estudos foca em áreas geográficas maiores, como regiões ou bacias hidrográficas, em vez de locais específicos.

Ao analisar as tendências ao longo das décadas, observa-se uma consolidação da resolução diária e regional. Na década de 1980, apenas a resolução diária e regional foi observada. Na década de 1990, houve uma pequena diversificação, com a introdução da resolução horária e local. No entanto, a partir da década de 2000, a resolução diária e regional tornou-se dominante, com 100% de prevalência nas décadas de 2010 e 2020. Isso reflete uma padronização nas abordagens de modelagem, possivelmente impulsionada por avanços tecnológicos e a necessidade de comparabilidade entre estudos.

Logo, os dados mostram que a comunidade científica prioriza a resolução diária e regional na modelagem de precipitação, com uma tendência clara de consolidação dessas características ao longo do tempo. A resolução horária e local, embora presente em alguns estudos, é menos comum, sugerindo que são aplicadas em contextos específicos ou em fases iniciais de pesquisa.

4.4 VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E FONTE DE DADOS

A análise dos 32 artigos revela que 59,4% deles identificam as variáveis climáticas e meteorológicas relevantes que afetam a precipitação, enquanto 40,6% não as identificam, mas mencionam as fontes de dados utilizadas. Isso indica que, embora a maioria dos estudos busque compreender os fatores que influenciam a precipitação, uma parcela significativa foca mais na coleta e no uso de dados do que na exploração das variáveis climáticas específicas.

Ao longo das décadas, observa-se uma evolução clara tanto nas variáveis climáticas estudadas quanto nas fontes de dados utilizadas. Na década de 1980, os artigos se concentravam em variáveis relacionadas à precipitação, como profundidade e duração dos eventos, utilizando principalmente dados de pluviômetros. Já na década de 1990, houve uma introdução de variáveis mais complexas, como circulação atmosférica, temperatura e pressão, com o uso de dados de pressão atmosférica e registros meteorológicos.

Na década de 2000, a modelagem de precipitação expandiu-se para incluir variáveis como topografia, gradiente de terreno e umidade relativa, com o uso de reanálises, dados interpolados e radiossondas. A década de 2010 marcou uma diversificação ainda maior, com a introdução de variáveis como altitude, latitude, longitude e índices oceânicos-atmosféricos (IPO-PDO), além da expansão do uso de dados de satélite, modelos climáticos regionais e séries paleoclimáticas.

Na década de 2020, observa-se uma redução no número de artigos que identificam variáveis climáticas, com apenas 20% dos estudos destacando variáveis específicas. No entanto, há uma consolidação do uso de fontes de dados avançadas, como satélites e modelos climáticos globais (GCMs), refletindo uma tendência de priorizar a coleta e o processamento de dados de alta resolução.

Conclui-se assim que, ao longo do tempo, houve uma transição de estudos focados em variáveis simples e dados locais (como pluviômetros) para uma abordagem mais complexa e integrada, que combina variáveis climáticas detalhadas com fontes de dados avançadas, como satélites e modelos globais. Essa evolução reflete os avanços tecnológicos e a necessidade de modelos mais precisos para lidar com os desafios das mudanças climáticas e da gestão de recursos hídricos.

4.5 TIPOS DE PRECIPITAÇÃO E PROCESSOS FÍSICOS

A análise dos 32 artigos revela que 59,4% deles consideram processos físicos e meteorológicos em seus modelos de precipitação, enquanto 40,6% não abordam esses processos. Isso indica que, embora a maioria dos estudos busque compreender os mecanismos que influenciam a precipitação, uma parcela significativa foca mais na coleta e no uso de dados do que na exploração dos processos físicos e meteorológicos subjacentes.

Ao longo das décadas, observa-se uma evolução clara na abordagem dos processos físicos e meteorológicos. Na década de 1980, os estudos se concentravam em processos específicos, como tempestades convectivas. Na década de 1990, houve uma introdução de conceitos mais amplos, como a relação entre circulação atmosférica e a ocorrência de chuva, além da influência da temperatura e da umidade na formação de precipitação. Na década de 2000, os estudos expandiram-se para incluir gradientes espaciais e efeitos orográficos, refletindo uma maior complexidade na modelagem.

A partir da década de 2010, houve uma diversificação significativa dos processos considerados, com a introdução de conceitos como advecção, difusão, convecção, circulação de monção e variabilidade interanual. Essa tendência continuou na década de 2020, com uma consolidação do uso de relações estatísticas entre temperatura e precipitação, indicando uma priorização de análises quantitativas e modelagem.

É importante destacar que, em todos os artigos, a única forma de precipitação considerada foi a chuva. Não houve menção a outros tipos de precipitação, como neve ou granizo, o que reflete o foco dos estudos em regiões e contextos em que a chuva é a forma predominante de precipitação.

Assim, ao longo do tempo, houve uma transição de estudos focados em processos específicos e locais para uma abordagem mais complexa e integrada, que combina múltiplos processos físicos e meteorológicos com técnicas avançadas de análise estatística. Essa evolução reflete os avanços tecnológicos e a necessidade de modelos mais precisos para lidar com os desafios das mudanças climáticas e da gestão de recursos hídricos.

4.6 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

A análise dos métodos de calibração e validação de modelos de precipitação ao longo das décadas

revela uma evolução significativa, impulsionada pelo avanço da tecnologia e pela necessidade de modelos mais precisos e confiáveis. O Quadro 2 mostra os métodos mais utilizados por década.

Quadro 2: Métodos mais utilizados ao longo das décadas.

Década	Métodos Mais Utilizados
1980	Correlação entre profundidade e duração; dados observacionais.
1990	Probabilidades condicionais; modelos estocásticos; máxima verossimilhança.
2000	Cadeias de Markov; simulated annealing; regressão não-linear; ajuste de distribuições.
2010	Redes neurais (ANN); MCMC; validação cruzada; ajuste de distribuições; dados de satélite.
2020	Deep learning (LSTM); copulas; otimização heurística (ISPSO); integração de satélites.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Na década de 1980, os métodos de calibração e validação eram relativamente simples e baseados em estatísticas descritivas. O artigo analisado desse período utilizou correlações entre profundidade e duração dos eventos de precipitação e dados observacionais confiáveis em zonas semiáridas. Esses métodos refletiam as limitações tecnológicas da época, com foco em ajustes empíricos e correlações básicas. A falta de diversificação de técnicas pode ser atribuída à escassez de dados e à capacidade computacional limitada.

Nos anos 1990, houve um avanço significativo com a introdução de métodos estatísticos mais sofisticados. Os artigos dessa década utilizaram probabilidades condicionais baseadas em séries temporais de padrões de circulação atmosférica e modelos estocásticos aplicados em escala regional. Além disso, métodos como máxima verossimilhança e comparação de estatísticas observadas e simuladas começaram a ser empregados. Essas técnicas permitiram uma melhor representação da variabilidade climática e uma validação mais robusta dos modelos.

A década de 2000 marcou um período de diversificação e otimização dos métodos de calibração e validação. Os artigos analisados, observou-se o uso de técnicas como cadeias de Markov, simulated annealing e regressão não-linear. Esses métodos permitiram ajustes mais precisos dos parâmetros dos modelos e uma melhor representação da precipitação em diferentes escalas espaciais e temporais. Além disso, o ajuste de distribuições (Weibull, GEV, Kappa) tornou-se comum, refletindo uma preocupação crescente com a representação estatística dos dados.

A década de 2010 foi marcada pelo uso de métodos computacionalmente intensivos e pela preocupação com a quantificação de incertezas. Com 12 artigos analisados, destacam-se técnicas como redes neurais artificiais (ANN), métodos Bayesianos (MCMC) e validação cruzada. Esses métodos permitiram uma calibração mais precisa e a incorporação de incertezas nos modelos. Além disso, o ajuste de distribuições (Poisson, geométrica, exponencial) e a integração de dados de satélite tornaram-se comuns, refletindo a disponibilidade crescente de dados e o avanço da tecnologia.

Na década de 2020, os métodos de calibração e validação atingiram um novo patamar de sofisticação. Os artigos analisados, observou-se o uso de técnicas como deep learning (LSTM), copulas e otimização

heurística (ISPSO). Esses métodos permitiram uma representação mais precisa da precipitação, especialmente em escalas temporais e espaciais finas. Além disso, a integração de dados de satélite e modelos hidrológicos distribuídos (como W-flow) tornou-se uma tendência, refletindo a necessidade de modelos mais realistas e aplicáveis em diferentes contextos.

Ao longo das décadas, os métodos de calibração e validação evoluíram de técnicas simples e empíricas para abordagens computacionalmente intensivas e sofisticadas. Essa evolução foi impulsionada pelo avanço da tecnologia e pela disponibilidade crescente de dados. A partir da década de 2010, houve uma preocupação crescente com a quantificação de incertezas, utilizando métodos como MCMC e validação cruzada. Isso reflete a necessidade de modelos mais confiáveis e robustos. Na década de 2020, a integração de dados de satélite e modelos hidrológicos tornou-se uma tendência, permitindo uma representação mais realista da precipitação e sua variabilidade. O uso de técnicas de inteligência artificial, como redes neurais (ANN) e deep learning (LSTM), tornou-se comum nas décadas de 2010 e 2020, refletindo o potencial dessas técnicas para melhorar a precisão dos modelos.

4.7 IMPACTOS NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E AGRICULTURA

Os avanços na modelagem de precipitação têm impactado positivamente a gestão de recursos hídricos e a agricultura de várias maneiras. Em primeiro lugar, a melhoria na previsão de eventos de precipitação permite uma gestão mais eficiente de reservatórios e sistemas de irrigação. Modelos mais precisos ajudam a prever a disponibilidade de água, o que é crucial para o planejamento agrícola, especialmente em regiões semiáridas onde a água é um recurso escasso. Além disso, a capacidade de prever eventos extremos, como secas e enchentes, tem sido essencial para a mitigação de riscos e a preparação para desastres naturais.

A integração de dados de satélite e observações terrestres trouxe avanços significativos na previsão de eventos extremos e na gestão de recursos hídricos. Modelos que incorporam esses dados permitem alertas precoces para enchentes e secas, ajudando na operação de reservatórios e no planejamento de infraestrutura hídrica. Isso é particularmente importante para a agricultura, onde a previsão de disponibilidade de água e a mitigação de riscos agrícolas são fundamentais para garantir a segurança alimentar.

Outro impacto importante dos avanços na modelagem de precipitação é a adaptação às mudanças climáticas. Modelos que incorporam projeções climáticas futuras permitem que agricultores e gestores de recursos hídricos se preparem para cenários de mudanças climáticas, como alterações nos padrões de precipitação e aumento na frequência de eventos extremos. Isso é crucial para a gestão sustentável dos recursos hídricos e para a resiliência da agricultura frente às mudanças climáticas.

O Quadro 3 abaixo resume os principais impactos dos avanços na modelagem de precipitação na gestão de recursos hídricos e agricultura por década.

Quadro 3. Principais avanços na gestão dos recursos hídricos e agricultura.

Década	Impactos na Gestão de Recursos Hídricos e Agricultura
1980	Melhoria na previsão de eventos de precipitação; apoio à agricultura em zonas semiáridas.
1990	Previsão de secas e cheias; planejamento de recursos hídricos e agricultura com base em padrões atmosféricos.
2000	Geração de padrões espaciais realistas; melhoria na alocação de recursos hídricos; apoio à agricultura.
2010	Alertas precoces para eventos extremos; previsão de disponibilidade de água para agricultura; planejamento de infraestrutura hídrica.
2020	Previsão de vazões e gestão de reservatórios; mitigação de riscos agrícolas; adaptação às mudanças climáticas.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Portanto, os avanços na modelagem de precipitação têm tido um impacto significativo na gestão de recursos hídricos e na agricultura. A melhoria na previsão de eventos de precipitação, a integração de dados de satélite e a adaptação às mudanças climáticas são alguns dos principais benefícios desses avanços.

4.8 TENDÊNCIAS EMERGENTES E INTEGRAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS

Nas décadas de 1980 e 1990, a modelagem de precipitação era dominada por métodos estatísticos tradicionais, como modelos baseados em eventos e estocásticos, com foco em zonas semiáridas e padrões atmosféricos. Essas abordagens, embora eficazes para o contexto da época, eram limitadas pela falta de dados e capacidade computacional. A partir da década de 2000, houve um avanço significativo com a introdução de técnicas como modelos de cascata aleatória e downscaling estatístico, que permitiram uma representação mais precisa da precipitação em escalas regionais e locais.

A década de 2010 marcou o início da integração de técnicas de IA/ML na modelagem de precipitação, com o uso de redes neurais artificiais (ANN) para downscaling e previsão de precipitação. Além disso, a integração de dados de satélite e o uso de métodos Bayesianos para quantificação de incertezas trouxeram avanços significativos na precisão das previsões. Na década de 2020, a consolidação de técnicas de deep learning, como LSTM (Long Short-Term Memory), e o uso de copulas e otimização heurística (ISPSO) destacaram-se como tendências emergentes. Essas técnicas permitiram previsões mais precisas e adaptáveis a cenários de mudanças climáticas.

A integração de IA/ML na modelagem de precipitação começou a ganhar destaque na década de 2010, com o uso de redes neurais (ANN) para downscaling e previsão de precipitação. No entanto, foi na década de 2020 que essas técnicas se consolidaram, com o uso generalizado de deep learning (LSTM) e técnicas de otimização heurística. Esses avanços permitiram não apenas melhorar a precisão das previsões, mas também quantificar incertezas e adaptar os modelos a cenários de mudanças climáticas.

O Quadro 4 apresenta um resumo da evolução das tendências e da modelagem ao longo das décadas de acordo com os artigos analisados.

Quadro 4. Análise das tendências e integração com a IA/ML por décadas.

Década	Tendências Emergentes	Integração de IA/ML
1980	Modelos baseados em eventos; foco em zonas	Não mencionada.

	semiáridas.	
1990	Modelos estocásticos; classificação atmosférica.	Não mencionada.
2000	Modelos de cascata aleatória; downscaling estatístico; ajuste de distribuições.	Não mencionada.
2010	Integração de dados de satélite; modelos Bayesianos; redes neurais (ANN).	Redes neurais (ANN) para downscaling e previsão.
2020	Deep learning (LSTM); copulas; integração de dados de satélite; otimização heurística.	Deep learning (LSTM); técnicas de ML para ajuste de parâmetros e otimização.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

4.9 CARACTERÍSTICAS DAS PUBLICAÇÕES MAIS INFLUENTES SOBRE MODELOS DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO SÉRIES TEMPORAIS

Foram avaliados os quarenta por cento dos artigos mais citados em cada década de análise, entre 1982-2023. Na Tabela 3, tem-se a quantidade de artigos por década e o total correspondente lido a 40% de cada década.

Tabela 3. Dados de quantidade de artigos após a triagem final dividido por décadas e quantidade lida.

Década	Total de Artigos	Quantidade lida
1980	2	1
1990	11	5
2000	20	8
2010	30	12
2020	15	6

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A quantidade final de artigos após toda análise de exclusão foi de 78, nos quais ao extrair os 40% de cada década, que foram lidos, o somatório corresponde ao equivalente de 32 artigos, que corresponde a cerca de 41% do total final de artigos selecionados.

Os artigos publicados mais citados estão dispostos no Quadro 5.

Quadro 5. Artigos publicados.

Nº	Título	Autores	Ano
1	Practical generation of synthetic rainfall event time series in a semi-arid climatic zone	Bogárdi, János J.; Duckstein, Lucien; Rumambo, Omar H.	1988
2	Modeling daily rainfall using a semi-Markov representation of circulation pattern occurrence	Bardossy, Andras; Plate, Erich J.	1991
3	Regression model for generating time series of daily precipitation amounts for climate change impact studies	Buishand T.A. ; Klein Tank A.M.G.	1996
4	Further developments of the neyman-scott clustered point process for modeling rainfall	Cowpertwait, P.S.P.	1991
5	Precipitation and air flow indices over the British Isles	Conway, D., Wilby, R.L., Jones, P.D.	1996
6	Generating precipitation time series using simulated annealing	Bárdossy, A.	1998
7	The collaborative historical African rainfall model: Description and evaluation	Funk, Chris; Michaelsen, Joel; Verdin, Jim; Artan, Guleid; Husak, Greg; Senay, Gabriel; Gadain, Hussein; Magadzire, Tamuka	2003

8	Time series analysis model for rainfall data in Jordan: Case study for using time series analysis	King Abdul Aziz University, Jeddah, Saudi Arabia	2009
9	Tests of a space-time model of daily rainfall in southwestern Australia based on nonhomogeneous random cascades	Jothityangkoon, Chatchai; Sivapalan, Murugesu; Viney, Neil R.	2000
10	Downscaling temperature and precipitation: A comparison of regression-based methods and artificial neural networks	Schoof, J.T., Pryor, S.C.	2001
11	Multivariate rainfall disaggregation at a fine timescale	Koutsoyiannis, D., Onof, C., Wheeler, H.S.	2003
12	A spatial rainfall generator for small spatial scales	Willems, P.	2001
13	A space-time hybrid hourly rainfall model for derived flood frequency analysis	Haberlandt, U., Ebner Von Eschenbach, A.-D., Buchwald, I.	2008
14	Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation	Arnaud, P., Lavabre, J.	2002
15	A rainfall model based on a Geographically Weighted Regression algorithm for rainfall estimations over the arid Qaidam Basin in China	Li, Aifeng; Zhou, Lei	2016
16	Finding the most appropriate precipitation probability distribution for stochastic weather generation and hydrological modelling in Nordic watersheds	Li, Zhi; Brissette, Francois; Chen, Jie	2013
17	Downscaling transient climate change using a Neyman-Scott Rectangular Pulses stochastic rainfall model	Burton, A., Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Kilsby, C.G.	2010
18	A dynamic nonstationary spatio-temporal model for short term prediction of precipitation	Sigrist, F., Künsch, H.R., Stahel, W.A.	2012
19	Application of a stochastic weather generator to assess climate change impacts in a semi-arid climate: The Upper Indus Basin	Forsythe, N., Fowler, H.J., Blenkinsop, S., ...Harpham, C., Hashmi, M.Z.	2014
20	Climate-informed stochastic hydrological modeling: Incorporating decadal-scale variability using paleo data	Henley, B.J., Thyer, M.A., Kuczera, G., Franks, S.W.	2011
21	Precipitation Modeling by Polyhedral RCMARS and Comparison with MARS and CMARS	Özmen, A., Batmaz, İ., Weber, G.-W.	2014
22	Statistical downscaling of precipitation using a stochastic rainfall model conditioned on circulation patterns - an evaluation of assumptions	Haberlandt, U., Belli, A., Bárdossy, A.	2015
23	Regionalization of the modified Bartlett-Lewis rectangular pulse stochastic rainfall model	Kim, D., Olivera, F., Cho, H., Socolofsky, S.A.	2013
24	Short time step continuous rainfall modeling and simulation of extreme events	Callau Poduje, A.C., Haberlandt, U.	2017
25	Models of daily rainfall cross-correlation for the United Kingdom	Burton, A., Glenis, V., Jones, M.R., Kilsby, C.G.	2013
26	Regionalization of the Modified Bartlett-Lewis rectangular pulse stochastic rainfall model across the Korean Peninsula	Kim, D., Kwon, H.-H., Lee, S.-O., Kim, S.	2016
27	Forecast of rainfall distribution based on fixed sliding window long short-term memory	Chen, C., Zhang, Q., Kashani, M.H., ... Dash, S.S., Chau, K.-W.	2022
28	Rainfall Generation Revisited: Introducing CoSMoS-2s and Advancing Copula-Based Intermittent Time Series Modeling	Papalexiou, S.M.	2022

29	Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil Tendências da precipitação pluvial e da temperatura no Nordeste Brasileiro	de Carvalho, A.A., de A. Montenegro, A.A., da Silva, H.P., ... de Moraes, J.E.F., da Silva, T.G.F.	2020
30	Development and hydrometeorological evaluation of a new stochastic daily rainfall model: Coupling Markov chain with rainfall event model	Gao, C., Booij, M.J. , Xu, Y.-P.	2020
31	A robust method to develop future rainfall IDF curves under climate change condition in two major basins of Iran	Khazaei, M.R.	2021
32	The Reliability of W-flow Run-off-Rainfall Model in Predicting Rainfall to the Discharge	Tama, D.R., Limantara, L.M., Suhartanto, E., Devia, Y.P.	2023

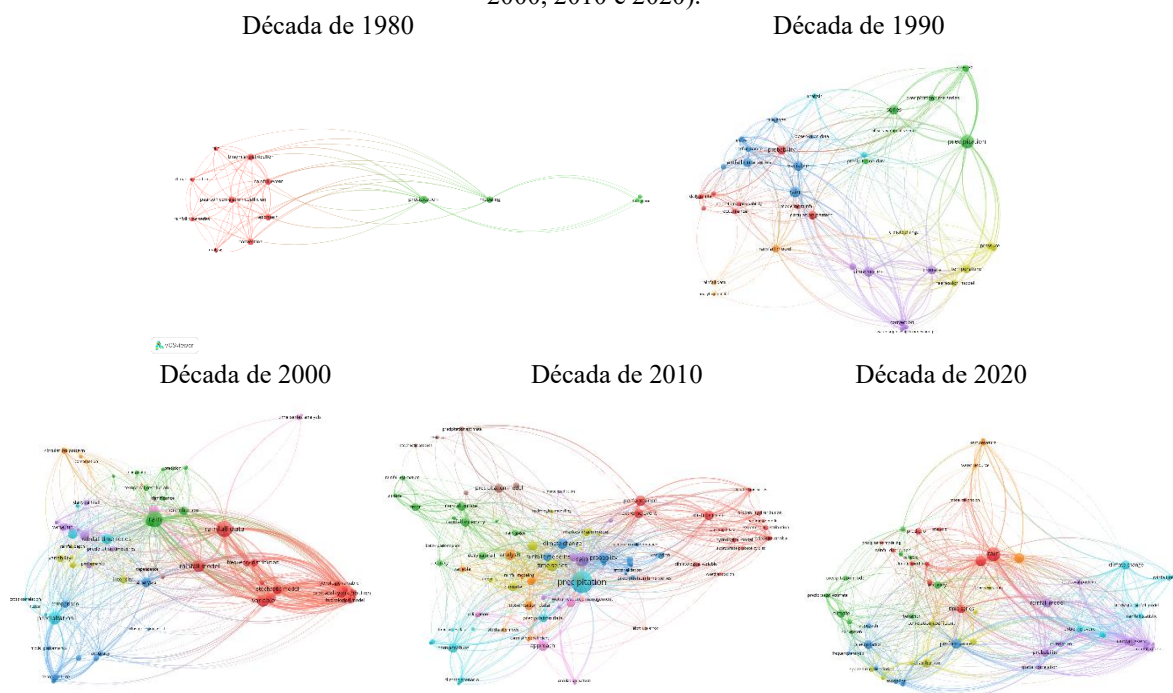
Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

4.10 TOPOLOGIA DAS DÉCADAS COMO FOCOS DE INVESTIGAÇÃO E DAS REDES SEMÂNTICAS

A Figura 2 mostra uma análise da rede de ocorrência de co-palavras-chave, que pode ser usada para identificar o estado da arte. O tópico de pesquisa que é a Modelagem Matemática da precipitação foi categorizado em quatro clusters coloridos, seguindo a composição ao longo do tempo: década de 1980 (2 clusters), década de 1990 (7 clusters), década de 2000 (9 clusters), década de 2010 (10 clusters), década de 2020 (7 clusters).

Os 10 termos mais citados ao longo dos clusters incluem: "precipitação", "chuva", "probabilidade", "séries temporais", "desempenho", "mudança climática", "intensidade da precipitação", "distribuição", "precisão" e "previsão". Esses termos refletem a evolução da modelagem da precipitação, indo de análises simples de chuva e probabilidade para complexos modelos preditivos que integram dados de séries temporais, previsões de eventos extremos e o impacto das mudanças climáticas.

Figura 4 - Rede de co-ocorrência de palavras apresentadas nos títulos, resumos e palavras-chave para cada década (1980, 1990, 2000, 2010 e 2020).



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Entre 1982 e 1989, os estudos sobre modelagem da precipitação, com apenas duas publicações, concentraram-se em dois clusters principais. O Cluster 1 inclui termos como "chuva", "distribuição binomial" e "evento de precipitação", refletindo uma abordagem baseada em métodos estatísticos e probabilísticos, como a distribuição binomial e o coeficiente de correlação de Pearson, para analisar eventos de chuva. A presença de "séries temporais" e "convecção" indica o uso de dados temporais e processos atmosféricos no estudo desses fenômenos. Já o Cluster 2 destaca termos como "precipitação", "modelagem" e "comportamento", sugerindo um foco na modelagem dos processos de precipitação e na análise do comportamento desses fenômenos sob diferentes condições climáticas. Esses clusters marcam o início das investigações sobre padrões de chuva e suas variações.

Entre 1990 e 1999, os estudos sobre modelagem da precipitação expandiram-se, com 11 publicações distribuídas em sete clusters. O Cluster 1 destacou termos como "probabilidade", "precipitação diária" e "probabilidade condicional", indicando o uso de métodos estatísticos avançados para modelar eventos de chuva e suas probabilidades. O Cluster 2 focou em "precipitação", "séries temporais" e "precisão", refletindo análises temporais e a busca por maior acurácia na previsão de dados de precipitação. O Cluster 3 combinou "chuva", "probabilidade", "dados de observação" e "desempenho", apontando para o uso de dados observacionais e métricas de performance em modelos climáticos. O Cluster 4 introduziu variáveis como "temperatura", "pressão", "mudança climática" e "modelo de regressão", relacionando mudanças climáticas a padrões de precipitação. O Cluster 5 destacou "séries temporais", "clima" e "convecção", com foco em análises climáticas e modelos de circulação atmosférica. O Cluster 6 enfatizou "variação" e

"análise", explorando variações climáticas e técnicas analíticas. Por fim, o Cluster 7 destacou "modelo de precipitação" e "dados de precipitação", refletindo a modelagem quantitativa baseada em dados observacionais. Esses clusters mostram uma evolução nos métodos, com maior integração de estatística, séries temporais, variáveis atmosféricas e mudanças climáticas no estudo da precipitação.

Entre 2000 e 2009, os estudos sobre modelagem da precipitação tornaram-se mais complexos, com 20 publicações distribuídas em nove clusters. O Cluster 1 destacou termos como "dados de precipitação", "modelo de precipitação", "modelo estocástico" e "distribuição de probabilidade", indicando o uso de modelos estatísticos e hidrológicos para analisar a variabilidade da precipitação. O Cluster 2 focou em "chuva", "distribuição", "resolução temporal" e "dados diários", com ênfase na distribuição espacial e temporal da precipitação. O Cluster 3 combinou "análise", "precisão" e "temperatura", refletindo a avaliação de modelos climáticos e a análise de dados atmosféricos. O Cluster 4 destacou "variabilidade", "intensidade", "cenário climático" e "profundidade da precipitação", explorando variações e intensidades das chuvas em diferentes cenários. O Cluster 5 focou em "séries temporais" e "variação", com modelagem da precipitação no espaço-tempo. O Cluster 6 incluiu "precipitação", "séries temporais de precipitação", "pluviômetro" e "estimativa de precipitação", utilizando dados observacionais para alimentar modelos. O Cluster 7 destacou "padrão de circulação", analisando a interação entre padrões atmosféricos e precipitação. O Cluster 8 focou em "dependência" e "amplitude", estudando inter-relações entre variáveis climáticas e eventos de precipitação. O Cluster 9 enfatizou "abordagem" e "análise de séries temporais", com foco metodológico em séries temporais e análise detalhada de dados. Esses clusters mostram um avanço significativo na modelagem da precipitação, com maior complexidade, integração de séries temporais, variáveis hidrológicas e modelos estocásticos, refletindo a evolução das técnicas de pesquisa climática.

Entre 2010 e 2019, os estudos sobre modelagem da precipitação apresentaram uma abordagem diversificada e altamente técnica, com 30 publicações distribuídas em dez clusters. O Cluster 1 destacou termos como "desempenho", "distribuição", "evento extremo" e "distribuição de probabilidade", com foco na avaliação de modelos de precipitação e previsão de eventos climáticos extremos. O Cluster 2 enfatizou "modelo de precipitação", "intensidade de precipitação", "erro" e "pluviômetro", indicando interesse na medição da intensidade da chuva e na precisão dos modelos com base em dados observacionais. O Cluster 3 abordou "probabilidade", "mudança climática" e "séries temporais de precipitação", relacionando mudanças climáticas à modelagem da precipitação com ênfase em dados temporais. O Cluster 4 focou em "séries temporais", "variabilidade", "intensidade" e "modelo de cadeia de Markov", utilizando métodos avançados para prever variações na precipitação. O Cluster 5 destacou "chuva" e "previsão", com termos como "modelo estatístico" e "análise de séries temporais", mostrando a aplicação de modelos estatísticos para previsão de chuva. O Cluster 6 explorou "precipitação", "temperatura" e "cenário climático", analisando interações entre variáveis climáticas e cenários futuros. O Cluster 7 incluiu "análise",

"validação" e "dados de observação", com foco na validação de modelos e análise de precisão. O Cluster 8 destacou "modelo de precipitação", "krigagem" e "processo estocástico", utilizando técnicas espaciais e estocásticas avançadas. O Cluster 9 enfatizou "abordagem" e "calibração", refletindo a importância da calibração de modelos para garantir precisão. O Cluster 10 focou em "séries temporais de precipitação" e "gestão de recursos hídricos", destacando a relevância da análise temporal para a gestão eficiente de recursos hídricos. Esses clusters demonstram um alto grau de sofisticação, com avanços em técnicas estatísticas, previsão de eventos extremos, modelagem espacial e integração de variáveis climáticas, refletindo a complexidade e interdisciplinaridade da pesquisa climática nesse período.

Entre 2020 e 2023, os estudos sobre modelagem da precipitação aprofundaram-se em temas como previsões climáticas, variabilidade e eventos de chuva, com 15 publicações distribuídas em sete clusters. O Cluster 1 destacou "chuva", "previsão", "análise" e "dados de precipitação", com foco em previsões de eventos de chuva baseadas em análises detalhadas de dados observacionais. O Cluster 2 enfatizou "precisão", "clima", "dados meteorológicos", "modelo de precipitação" e "estimativa de precipitação", refletindo a busca por maior confiabilidade nos modelos climáticos. O Cluster 3 focou em "desempenho", "abordagem" e "modelagem", com estudos voltados à avaliação e aprimoramento das técnicas de modelagem. O Cluster 4 destacou "distribuição", "variabilidade", "coeficiente de correlação" e "dados de séries temporais", indicando análises detalhadas da variabilidade da precipitação ao longo do tempo. O Cluster 5 concentrou-se em "modelo de precipitação", "padrão temporal", "probabilidade" e "evento de precipitação", com foco em modelagem estocástica e análise de padrões temporais de chuva. O Cluster 6 destacou "mudança climática", "evento extremo", "modelagem hidrológica" e "intensidade da precipitação", explorando os impactos de eventos extremos e mudanças climáticas na hidrologia. O Cluster 7 enfatizou "temperatura", "recursos hídricos" e "séries temporais de precipitação", analisando os efeitos da temperatura na disponibilidade de água e a variabilidade da precipitação. Esses clusters mostram uma forte ênfase no aprimoramento da precisão dos modelos, na análise de eventos extremos e mudanças climáticas, e no uso contínuo de séries temporais para entender padrões e variações da precipitação.

5 CONCLUSÃO

Este estudo realizou uma análise bibliométrica abrangente sobre os modelos de estimativa de precipitação utilizando séries temporais, identificando tendências, métodos e contribuições significativas ao longo das últimas quatro décadas. Os principais achados revelam uma evolução marcante na modelagem da precipitação, com um aumento progressivo na complexidade e na precisão dos métodos utilizados. Inicialmente, na década de 1980, os modelos eram baseados em técnicas estatísticas simples, como distribuições binomiais e correlações básicas. Ao longo do tempo, houve uma transição para métodos mais sofisticados, como modelos estocásticos, redes neurais artificiais (ANN) e, mais recentemente, técnicas de

deep learning (LSTM) e otimização heurística (ISPSO).

A análise destacou a importância da resolução temporal e espacial, com a maioria dos estudos adotando resoluções diárias e regionais, refletindo um equilíbrio entre detalhamento e viabilidade computacional. Além disso, a integração de dados de satélites e a utilização de técnicas de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (ML) tornaram-se tendências dominantes na última década, permitindo previsões mais precisas e adaptáveis a cenários de mudanças climáticas.

Os impactos práticos desses avanços são significativos, especialmente na gestão de recursos hídricos e na agricultura. Modelos mais precisos permitem uma previsão mais confiável de eventos extremos, como secas e enchentes, contribuindo para a mitigação de riscos e o planejamento sustentável de infraestruturas hídricas e agrícolas. A adaptação às mudanças climáticas também foi um tema central, com modelos que incorporam projeções futuras ajudando a preparar agricultores e gestores para cenários climáticos adversos.

Em termos de contribuições teóricas, o estudo mapeou as principais tendências metodológicas, destacando a importância da quantificação de incertezas, a integração de múltiplas variáveis climáticas e o uso de técnicas avançadas de análise estatística e espacial. A análise bibliométrica também identificou os principais países e instituições contribuintes, com os Estados Unidos liderando em número de publicações, seguidos pelo Reino Unido e Austrália.

Em síntese, este estudo reforça a relevância da modelagem da precipitação como uma área de pesquisa crucial para enfrentar os desafios climáticos contemporâneos. As descobertas destacam a necessidade contínua de inovação metodológica, colaboração internacional e integração de novas tecnologias, como IA e ML, para aprimorar a precisão e a aplicabilidade dos modelos de precipitação. Esses avanços não apenas contribuem para o avanço científico, mas também têm implicações práticas significativas para a gestão sustentável de recursos hídricos e a segurança alimentar em um contexto de mudanças climáticas globais.

REFERÊNCIAS

- ANTONINI, J. C. A.; SILVA, E. M.; OLIVEIRA, L. F. C.; SANO, E. E. Modelo matemático para estimativa da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 44, n. 4, p. 331-338, 2009.
- ARAI, H. et al. Estudo sobre a significância da precipitação na caracterização do clima regional. *Revista de Climatologia*, v. X, n. Y, p. 123-145, 2009.
- ARNAUD, P.; LAVABRE, J. Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resources Research*, v. 38, n. 11, p. 1241, 2002.
- BÁRDOSSY, A. Generating precipitation time series using simulated annealing. *Water Resources Research*, v. 34, n. 7, p. 1733-1741, 1998.
- BARDOSSY, Andras; PLATE, Erich J. Modeling daily rainfall using a semi-Markov representation of circulation pattern occurrence. *Journal of Hydrology*, v. 122, n. 1-4, p. 33-47, 1991.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. (Eds.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: ABRH, 2009.
- BOGÁRDI, János J.; DUCKSTEIN, Lucien; RUMAMBO, Omar H. Practical generation of synthetic rainfall event time series in a semi-arid climatic zone. *Journal of Hydrology*, v. 102, n. 1-4, p. 335-355, 1988.
- BORSATO, V. A. A climatologia dinâmica e o ensino da geografia no segundo grau: uma aproximação ao problema. *Revista GeoNotas*, v. 4, n. 1, 2000. ISSN 1415-0646.
- BUISHAND, T. A.; KLEIN TANK, A. M. G. Regression model for generating time series of daily precipitation amounts for climate change impact studies. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 53, n. 1-3, p. 1-19, 1996.
- BURTON, A.; FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S.; KILSBY, C. G. Downscaling transient climate change using a Neyman-Scott Rectangular Pulses stochastic rainfall model. *Journal of Hydrology*, v. 381, n. 1-2, p. 18-32, 2010.
- BURTON, A.; GLENIS, V.; JONES, M. R.; KILSBY, C. G. Models of daily rainfall cross-correlation for the United Kingdom. *Environmental Modelling & Software*, v. 49, p. 22-33, 2013.
- CAFÉ, L.; BRASCHER, M. Organização da informação e bibliometria. *Encontros Bibli: Revista Eletrônica de Biblioteconomia e Ciência da Informação*, Florianópolis, n. esp., p. 54-75, 1º sem. 2008.
- CALLAU PODUJE, A. C.; HABERLANDT, U. Short time step continuous rainfall modeling and simulation of extreme events. *Journal of Hydrology*, v. 550, p. 324-336, 2017.
- CARLETOO, C. Subcoberturas: aplicação de isolantes térmicos em sistemas de coberturas. 193 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Orgs.). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 459 p.

CHEN, C.; ZHANG, Q.; KASHANI, M. H.; DASH, S. S.; CHAU, K.-W. Forecast of rainfall distribution based on fixed sliding window long short-term memory. *Water Resources Research*, v. 58, n. 1, p. e2021WR031641, 2022.

CONWAY, D.; WILBY, R. L.; JONES, P. D. Precipitation and air flow indices over the British Isles. *Climate Research*, v. 5, n. 2, p. 169-185, 1996.

COWPERTWAIT, P. S. P. Further developments of the Neyman-Scott clustered point process for modeling rainfall. *Water Resources Research*, v. 27, n. 7, p. 1431-1438, 1991.

DE CARVALHO, A. A.; DE A. MONTENEGRO, A. A.; DA SILVA, H. P.; DE MORAIS, J. E. F.; DA SILVA, T. G. F. Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 1, p. 15-23, 2020.

FORSYTHE, N.; FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S.; HARPHAM, C.; HASHMI, M. Z. Application of a stochastic weather generator to assess climate change impacts in a semi-arid climate: The Upper Indus Basin. *Journal of Hydrology*, v. 517, p. 1019-1034, 2014.

FUNK, Chris; MICHAELSEN, Joel; VERDIN, Jim; ARTAN, Guleid; HUSAK, Greg; SENAY, Gabriel; GADAIN, Hussein; MAGADAZIRE, Tamuka. The collaborative historical African rainfall model: Description and evaluation. *International Journal of Climatology*, v. 23, n. 1, p. 47-66, 2003.

GAO, C.; BOOIJ, M. J.; XU, Y.-P. Development and hydrometeorological evaluation of a new stochastic daily rainfall model: Coupling Markov chain with rainfall event model. *Journal of Hydrology*, v. 588, p. 125337, 2020.

GUEDES, V. L. S.; BORSHIVER, S. Bibliometria: uma ferramenta estatística para a gestão da informação e do conhecimento. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO, 6., 2005, Salvador. Anais [...]. Salvador: ENANCIB, 2005. p. 1-18.

HABERLANDT, U.; BELLI, A.; BÁRDOSSY, A. Statistical downscaling of precipitation using a stochastic rainfall model conditioned on circulation patterns - an evaluation of assumptions. *International Journal of Climatology*, v. 35, n. 2, p. 217-231, 2015.

HABERLANDT, U.; EBNER VON ESCHENBACH, A.-D.; BUCHWALD, I. A space-time hybrid hourly rainfall model for derived flood frequency analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 12, n. 6, p. 1353-1367, 2008.

HENLEY, B. J.; THYER, M. A.; KUCZERA, G.; FRANKS, S. W. Climate-informed stochastic hydrological modeling: Incorporating decadal-scale variability using paleo data. *Water Resources Research*, v. 47, n. 10, p. W00H10, 2011.

JOB, I. Bibliometria aplicada aos estudos do campo da Educação Física: confiabilidade, qualidade e relevância nas publicações. *Motrivivência, Florianópolis*, v. 30, n. 54, p. 18-34, 2018.

JOTHITYANGKON, Chatchai; SIVAPALAN, Murugesu; VINEY, Neil R. Tests of a space-time model of daily rainfall in southwestern Australia based on nonhomogeneous random cascades. *Water Resources Research*, v. 36, n. 1, p. 29-42, 2000.

KHAZAEI, M. R. A robust method to develop future rainfall IDF curves under climate change condition in two major basins of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 144, n. 1-2, p. 1-15, 2021.

KIM, D.; KWON, H.-H.; LEE, S.-O.; KIM, S. Regionalization of the Modified Bartlett–Lewis rectangular pulse stochastic rainfall model across the Korean Peninsula. *Journal of Hydro-environment Research*, v. 8, n. 4, p. 317-328, 2014.

KIM, D.; OLIVERA, F.; CHO, H.; SOCOLOFSKY, S. A. Regionalization of the modified Bartlett-Lewis rectangular pulse stochastic rainfall model. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, v. 23, n. 6, p. 631-642, 2012.

KING ABDUL AZIZ UNIVERSITY, Jeddah, Saudi Arabia. Time series analysis model for rainfall data in Jordan: Case study for using time series analysis. *American Journal of Environmental Sciences*, v. 5, n. 5, p. 599-604, 2009.

KOUTSOYIANNIS, D.; ONOF, C.; WHEATER, H. S. Multivariate rainfall disaggregation at a fine timescale. *Water Resources Research*, v. 39, n. 7, p. 1173, 2003.

LI, Zhi; BRISSETTE, Francois; CHEN, Jie. Finding the most appropriate precipitation probability distribution for stochastic weather generation and hydrological modelling in Nordic watersheds. *Hydrological Processes*, v. 27, n. 26, p. 3718-3729, 2013.

LUCENA, D. B. Impacto dos Oceanos Pacífico e Atlântico no Clima do Nordeste do Brasil. 225 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2008.

LV, Aifeng; ZHOU, Lei. A rainfall model based on a Geographically Weighted Regression algorithm for rainfall estimations over the arid Qaidam Basin in China. *Remote Sensing*, v. 8, n. 4, p. 311, 2016.

MONTEIRO, C. A. F. Clima e Excepcionalismo: Conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico. Florianópolis: UFSC, 1991.

ÖZMEN, A.; BATMAZ, İ.; WEBER, G.-W. Precipitation Modeling by Polyhedral RCMARS and Comparison with MARS and CMARS. *Environmental Modeling & Assessment*, v. 19, n. 5, p. 425-435, 2014.

PAPALEXIOU, S. M. Rainfall Generation Revisited: Introducing CoSMoS-2s and Advancing Copula-Based Intermittent Time Series Modeling. *Water Resources Research*, v. 58, n. 1, p. e2021WR031641, 2022.

PEDRO JÚNIOR, M. J.; SENTELHAS, P. C.; POMMER, C. V.; MARTINS, F. P. Determinação da temperatura-base, graus-dia e índice biometeorológico para a videira 'Niagara Rosada'. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 2, p. 51-56, 1994.

SANTANA, M. M. M.; MARIANO-NETO, E.; DE VASCONCELOS, R.; DODONOV, P. Mapping the research history, collaborations and trends of remote sensing in fire ecology. *Scientometrics*, v. 126, p. 1-20, 2021. DOI: 10.1007/s11192-020-03805-x.

SANTOS, Ananias Francisco dos; SANTOS, Claudiane da Silva dos; GOMES, Angelica da Silva. Análise bibliométrica das tendências e avanços nas pesquisas em sustentabilidade no período de 2019 a 2023. Sinop: Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, Campus Universitário de Sinop, 2023.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. C. *Hidrometria Aplicada*. Curitiba: Editora do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001.

SCHOOOF, J. T.; PRYOR, S. C. Downscaling temperature and precipitation: A comparison of regression-based methods and artificial neural networks. *International Journal of Climatology*, v. 21, n. 7, p. 773-790, 2001.

SIGRIST, F.; KÜNSCH, H. R.; STAHEL, W. A. A dynamic nonstationary spatio-temporal model for short term prediction of precipitation. *Annals of Applied Statistics*, v. 6, n. 4, p. 1452-1477, 2012.

SILVA, A. C. Estudos Climáticos e Ambiente Construído no Município de Descalvado - SP. 92 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

TAMA, D. R.; LIMANTARA, L. M.; SUHARTANTO, E.; DEVIA, Y. P. The Reliability of W-flow Run-off-Rainfall Model in Predicting Rainfall to the Discharge. *Civil Engineering Journal*, v. 9, n. 7, p. 15, 2023.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010.

VAN NUNEN, K.; LI, J.; RENIERS, G.; PONNET, K. Bibliometric analysis of safety culture research. *Safety Science*, v. 108, p. 248-258, 2018.

VECCHIA, F. Projeto Conforto Térmico. Estudo Comparativo do comportamento térmico de sistemas de cobertura. Projeto Conforto, Convênio Eternit S.A. São Carlos: EESC/FIPAI, 2001.

WILLEMS, P. A spatial rainfall generator for small spatial scales. *Journal of Hydrology*, v. 252, n. 1-4, p. 126-144, 2001.

WU, J. Thirty years of Landscape Ecology (1987–2017): retrospects and prospects. *Landscape Ecology*, v. 32, n. 12, p. 2225-2239, 2017.