



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Comparação de modelos geoestatísticos para estimativa de precipitação em Minas Gerais, Brasil, entre os anos hidrológicos de 2000 e 2021

Vinícius Lima Guimarães¹, Roberto de Carvalho Alves²

¹ Graduando em Geografia, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, CEP 31270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais. (31) 973093749. viniciusl.geo@gmail.com (autor correspondente).

² Analista de Saneamento, Hidrólogo, Companhia de Saneamento de Minas Gerais, Cercadinho, Rod. BR 356, Km 4, s/n, CEP 30320-765, Belo Horizonte, Minas Gerais. (31) 99837-5676. roberto_alves12@yahoo.com.br.

Artigo recebido em 11/06/2022 e aceito em 18/12/2022

RESUMO

A gestão integrada dos recursos hídricos no Brasil e no mundo tem passado por desafios provenientes de processos naturais e antrópicos. Assim, o conhecimento preciso das condições quantitativas e qualitativas dos recursos hídricos é de fundamental importância, sendo o monitoramento pluviométrico por estações pluviométricas distribuídas no estado um componente central deste, no que diz respeito ao entendimento da dinâmica espacial e temporal da precipitação. Em Minas Gerais, tais estações estão concentradas em determinadas áreas, dificultando o processo de tomada de decisão pelos agentes gestores. As técnicas de geoestatística têm se mostrado acuradas para estimativa de precipitação em espaços sem estações pluviométricas, sendo que tal trabalho visou aplicá-las no estado, nos anos hidrológicos de outubro de 2000 a setembro de 2021. Verificou-se o potencial dos modelos Circular, Gaussiano, Esférico, Tetraesférico, Pentaesférico e Exponencial, e o Grau de Dependência Espacial entre as variáveis, utilizando-se do tratamento de dados por linguagem de programação Python e R e por técnicas de geoprocessamento. Os resultados apontaram para maior aplicabilidade do modelo Gaussiano em toda a série histórica, sendo sucedido pelo modelo Exponencial em períodos chuvosos, e pelo modelo Circular na estação seca. Os modelos Pentaesférico, Esférico e Tetraesférico foram os menos aplicados. Viu-se também uma relação irregular entre o desempenho dos modelos e o Grau de Dependência Espacial das variáveis.

Palavras-chave: krigagem, dependência espacial, estações pluviométricas, gestão integrada dos recursos hídricos.

Comparison of geostatistical models for rainfall forecast in Minas Gerais, Brazil, between 2000 and 2021 hydrological years

ABSTRACT

The integrated water resources management in Brazil and worldwide had been through challenges from anthropic activities and natural processes. In that regard, the precise knowledge of water resources quality and quantity conditions has major importance, with the rainfall monitoring network by rainfall stations as a core component for understanding the precipitation spatial and temporal dynamics. These stations are concentrated in a few sites within Minas Gerais, which makes the decision-making process difficult for the manager agents. Geostatistical analysis has been shown as an accurate method for rainfall forecast in spaces with lack of rainfall stations, and this work aimed to apply it in Minas Gerais, between October 2000 and September 2021 hydrological years. It was checked Circular, Gaussian, Spherical, Tetraspherical, Pentaspherical, and Exponential models potential, and the degree of spatial dependence, using data treatment by Python and R programming language and geoprocessing tools. The results showed that Gaussian model has greater applicability in the time series, being succeeded by Exponential model in wet season, and Circular model in dry season. Pentaspherical, Spherical, and Tetraspherical models were the least applied. It was found an irregular relationship between models' performance and the degree of spatial dependence.

Keywords: kriging, degree of spatial dependence, rainfall stations, integrated water resources management.

Introdução

Cidades ao redor do mundo vêm passando por desafios relativos à escassez de água, como resultado de processos como a superexploração e degradação de corpos hídricos, enchentes, e a incapacidade financeira dos Estados de readequarem infraestruturas necessárias para adaptação a cenários de estresse hídrico (Yannopoulos et al., 2019; Koop et al., 2022). A ausência de oferta de água tratada, e o comportamento irregular de eventos de precipitação são alguns dos fatores adicionais que contribuem para este quadro (Yannopoulos et al., 2019; Tzanakakis et al., 2020).

Nos países em desenvolvimento, as ações de gestão dos recursos hídricos frente a estes desafios são usualmente reativas e ineficazes, sendo incapazes de estabelecer alternativas para adaptação a eventos extremos, e de atender à crescente demanda por água (Katusiime e Schüt, 2020; Koop et al., 2022).

Inserida neste contexto, a gestão integrada dos recursos hídricos no Brasil também passa por desafios, considerando o aumento da exploração das águas por atividades econômicas, problemas nos processos de abastecimento, tratamento e distribuição deste recurso, bem como os impactos causados pelas mudanças do uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas (Miranda, 2020; Xavier e Bentes, 2020; Getirana et al., 2021). Soma-se a tal cenário a oscilação de áreas com seca, e o aumento dos períodos de estiagem (Miranda, 2020; Xavier e Bentes, 2020).

Esta realidade é responsável por causar quebras de safra, em um país com o Produto Interno Bruto altamente vinculado a *commodities* agrícolas (Getirana et al., 2021), e desabastecimento energético, pela predominância de matriz hidráulica na geração de eletricidade em todo território nacional (Miranda et al., 2019). Desastres naturais e perdas econômicas em áreas vulneráveis, causadas por enchentes e deslizamentos, também são eventos frequentes (Dalagnol et al., 2021; Marengo et al., 2021; Alves et al., 2022).

Nesse sentido, o conhecimento preciso das condições de quantidade e qualidade da água é de fundamental importância para o processo de gestão e mitigação desses desafios, sendo o monitoramento pluviométrico um de seus componentes centrais, no que tange à compreensão da distribuição espacial e variação temporal da precipitação (Pereira et al., 2022).

No entanto, o monitoramento pluviométrico brasileiro é marcado pela escassez e

insuficiência de dados, além da inacessibilidade à informação simplificada para usuários finais (Getirana et al., 2021). Este quadro se manifesta no estado de Minas Gerais, em que as estações de monitoramento pluviométrico apresentam concentração em determinadas áreas.

Assim, urge a necessidade de técnicas para estimativa de precipitação em espaços sem estes instrumentos. Dentre estas técnicas, a geoestatística apresenta maior aplicabilidade, se comparada a outros métodos de interpolação baseados em critérios determinísticos, por levar em consideração o peso da distância no cálculo estimativo das variáveis, contemplando a dependência espacial entre observações espacialmente mais próximas, e possibilitar a medição do erro no processo de interpolação (Amini et al., 2019; Pirani e Modarres, 2020; Sahu et al., 2021).

Entre os tipos de interpolação por geoestatística, a krigagem ordinária se apresenta como método robusto para análise de séries históricas de precipitação, tendo em consideração sua alta performance na predição de dados em áreas com vazio de informações, e a possibilidade da minimização da redundância dos dados e do erro estimativo entre estações pluviométricas (Oriani et al., 2020; Pirani e Modarres, 2020; Charles et al., 2022; Chutsagulprom et al., 2022).

Mello e Sampaio (2019) apontaram para aplicabilidade da krigagem ordinária na espacialização de dados de média pluviométrica para o estado do Paraná, entre os anos de 1977 a 2006, apresentando o desempenho satisfatório do modelo exponencial.

Magerski e Filho (2021), por sua vez, indicaram a adequada performance do modelo estável para o preenchimento de falhas de dados pluviométricos mensais, nas sub-bacias do Baixo Rio Ivaí e Alto Rio Tibagi, no estado do Paraná.

No estado de Minas Gerais, a geoestatística por krigagem ordinária também se mostrou apta para mapeamento de séries históricas de precipitação e outras variáveis climáticas (Caram, 2007; Profeta, 2016; Almeida et al., 2018; Santos et al., 2019; Servidoni et al., 2019; Viana et al., 2019; Danta e Oliveira, 2021; Mota, 2021; Silva e Sarnighausen, 2021).

Não há, no entanto, a verificação da aplicabilidade de tal técnica, para todo o território de Minas Gerais, com a utilização de dados disponibilizados recentemente por sua rede pluviométrica.

Por conseguinte, tal trabalho buscou verificar os modelos geoestatísticos de krigagem ordinária que mais se adequam à estimativa de precipitação mensal para o estado de Minas Gerais.

A análise foi feita entre os anos hidrológicos de outubro de 2000 a setembro de 2021, considerando que tal técnica já se apresentou como adequada para análise pluviométrica no estado, em outros períodos históricos para todo seu território, e recentemente em extensões territoriais menores.

Assim, foram testados os modelos de semivariograma Esférico, Tetraesférico, Pentaesférico, Circular, Gaussiano, e exponencial, verificando a maior aplicabilidade destes de acordo com o ano, mês, estação, e o grau de autocorrelação espacial entre as estações pluviométricas.

Material e métodos

Localização e Caracterização da Área Experimental

Apresentando um clima altamente influenciado pela sua continentalidade e características geomorfológicas, o estado de Minas Gerais manifesta duas estações do ano bem definidas, sendo uma chuvosa, entre o período de outubro e março, e outra seca, entre os meses de abril e setembro, vide sua predominância pelos climas tropical e subtropical úmido com inverno seco (Ferreira et al., 2019; Santos et al., 2021).

Tal estado apresenta uma área de 586,51 km² (IBGE, 2021), e tem seu monitoramento pluviométrico quantitativo feito por 2388 estações, concentradas desigualmente em seu território (Figura 1), e operadas por 131 organizações públicas e privadas.

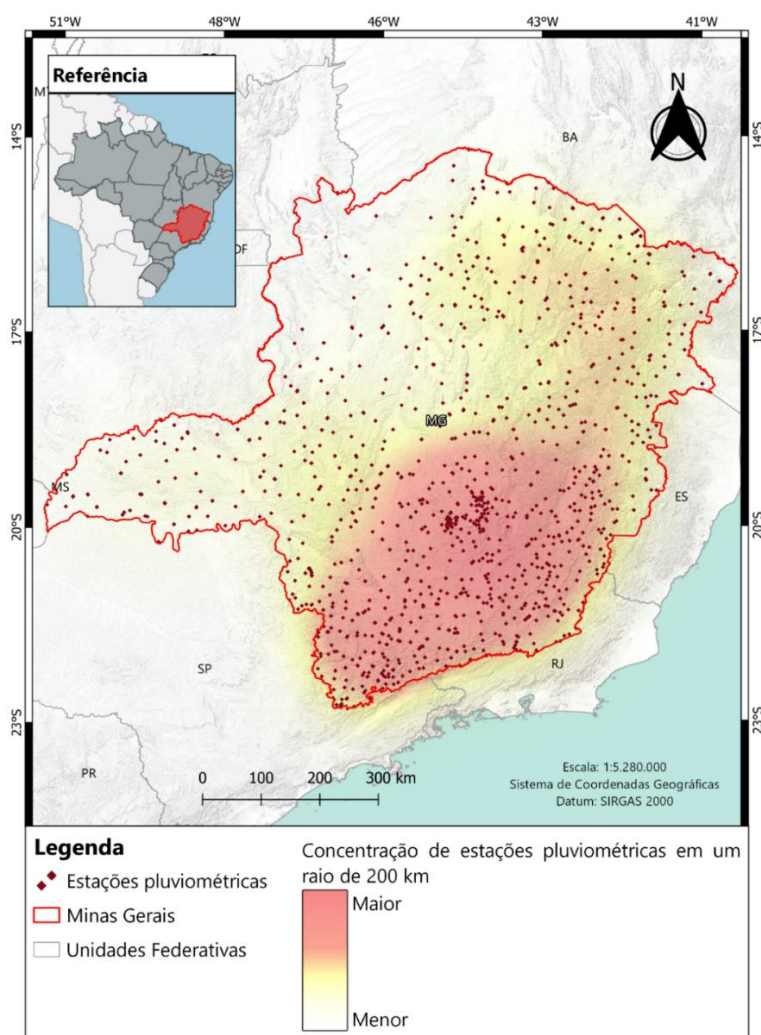


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e concentração de estações pluviométricas em um raio de 200 quilômetros, no estado de Minas Gerais, Brasil.

Coleta e tratamento dos dados

Coletaram-se os dados públicos de precipitação diária de todas as estações pluviométricas em Minas Gerais, e em um raio de 100 quilômetros do estado, pelo complemento ANA *Data Acquisition* do software QGIS 3.16, entre os anos hidrológicos de outubro de 2000 a setembro de 2021. Tal complemento permite selecionar as estações pluviométricas de acordo com sua posição georreferenciada, e adquirir suas informações de precipitação diária.

A escolha de coletar informações em um raio de 100 km do estado parte da tentativa de diminuição de erros na interpolação próxima aos limites de Minas Gerais, sendo adicionadas na análise outras 961 estações pluviométricas.

Os dados de precipitação diária foram tratados na linguagem de programação Python 3.6.9 para filtragem de informações válidas, sendo excluído da análise, por estação pluviométrica, os dias sem informação. Para tal, não foram utilizados módulos externos a versão nativa do Python.

Com as informações válidas de precipitação diária, para cada estação pluviométrica, fez-se o cálculo de precipitação mensal, para todos os 252 meses no período entre os anos hidrológicos de outubro de 2000 a setembro de 2021.

Os dados individualizados de precipitação mensal por estação pluviométrica foram unidos em uma única planilha, contendo os dados de precipitação mensal de todas as estações pluviométricas, a partir da linguagem de programação R 3.6.3.

Com o intuito de verificar a porcentagem de dados válidos por estação pluviométrica, fez-se também testes em linguagem de programação Python nos dados de precipitação diária, observando aquelas estações com mais de 60%, 70%, 80% e 90% dos dados válidos em toda série histórica.

Aplicação dos modelos geoestatísticos e análise dos dados

Os dados de precipitação mensal de todos os 252 meses no período de análise, para cada uma das estações pluviométricas, foram unidos em um único arquivo *shapefile* georreferenciado.

A partir deste arquivo, fez-se para cada mês uma superfície de precipitação interpolada por krigagem ordinária, utilizando-se da ferramenta *Geostatistical Analyst* do software ArcGIS 10.8.

Cada uma das superfícies interpoladas foi gerada de acordo com o modelo de semivariograma

que apresentava, no mês, o menor Erro Padronizado Médio, disponibilizado diretamente da validação cruzada do software ArcGIS 10.8.

Verificou-se para cada superfície a aplicabilidade dos modelos Circular, Gaussiano, Esférico, Tetraesférico, Pentaesférico e Exponencial, considerando que estes apresentam resultado satisfatório para interpolação de precipitação (Junior et al., 2020; Pirani e Modarres, 2020).

Assim, gerou-se 252 superfícies de cálculo de precipitação mensal para toda série histórica, sendo estas convertidas posteriormente em formato *tiff*.

Tabulou-se os erros dos processos de interpolação, verificando assim a performance e aplicabilidade da krigagem ordinária para análise de precipitação mensal no estado, no período analisado.

Fez-se uma análise da frequência de utilização de cada um dos modelos em toda série histórica, observando assim os modelos com maior e menor aplicabilidade, para os anos hidrológicos de outubro de 2000 a setembro de 2021. Constatou-se também o maior ou menor potencial do emprego de cada um dos modelos geoestatísticos, de acordo com o mês, ano, e estação do ano.

Por fim, verificou-se o índice de dependência espacial (IDE) dos modelos, sendo este um importante indicador da autocorrelação espacial entre variáveis interpoladas por geoestatística (Jin et al., 2019; Zhao et al., 2020; Silva et al., 2021).

Tal índice é expresso pela equação $C_0 / C_0 + C_1$, em que C_0 corresponde ao efeito pepita, medida de proporção do erro amostral presente nas variáveis, e $C_0 + C_1$ corresponde ao patamar de estabilização do semivariograma do modelo (Felicio et al., 2019; Secondi, 2021).

Os modelos com valores de IDE maiores ou iguais a 0,75 apresentam baixo grau de dependência espacial (GDE), entre 0,25 e 0,75 um GDE moderado, e menores que 0,25 um GDE alto. Modelos com alto grau de dependência espacial apontam para uma forte autocorrelação espacial entre as variáveis, e para a distância como um dos elementos principais na interpolação.

Resultados e discussão

Ao analisar os anos hidrológicos de outubro de 2000 a setembro de 2021, observou-se que dentre as 2388 estações presentes em Minas Gerais, somente 590 apresentaram quaisquer dados

válidos de precipitação diária, e que, dentre estas, apenas 41 tinham mais de 90% dos dados válidos, enquanto 11 possuíam entre 80% e 90%, 4 entre 70% e 80%, 5 entre 60% e 70%, e as outras 529 estações pluviométricas menos de 60% de dados válidos.

Tal cenário, atrelado à alta concentração de estações pluviométricas em determinadas porções territoriais, aponta para a inviabilidade da utilização exclusiva dos dados públicos como parâmetro de estimativa precisa da precipitação para toda a série histórica. Esta afirmativa parte da compreensão de que a acurácia dos resultados de

interpolações geoestatísticas depende da densidade e da representatividade temporal das estações pluviométricas utilizadas (Oriani et al., 2020; Rata et al., 2021).

Assim, a inclusão dos dados das estações pluviométricas da COPASA, e das medições em um raio de 100 km do estado, somados às estações de acesso público, compõem um quadro com uma maior quantidade de informações válidas. Foram utilizadas, assim, um total de 2147 estações pluviométricas nas interpolações por krigagem ordinária, como mostrado na Figura 2.

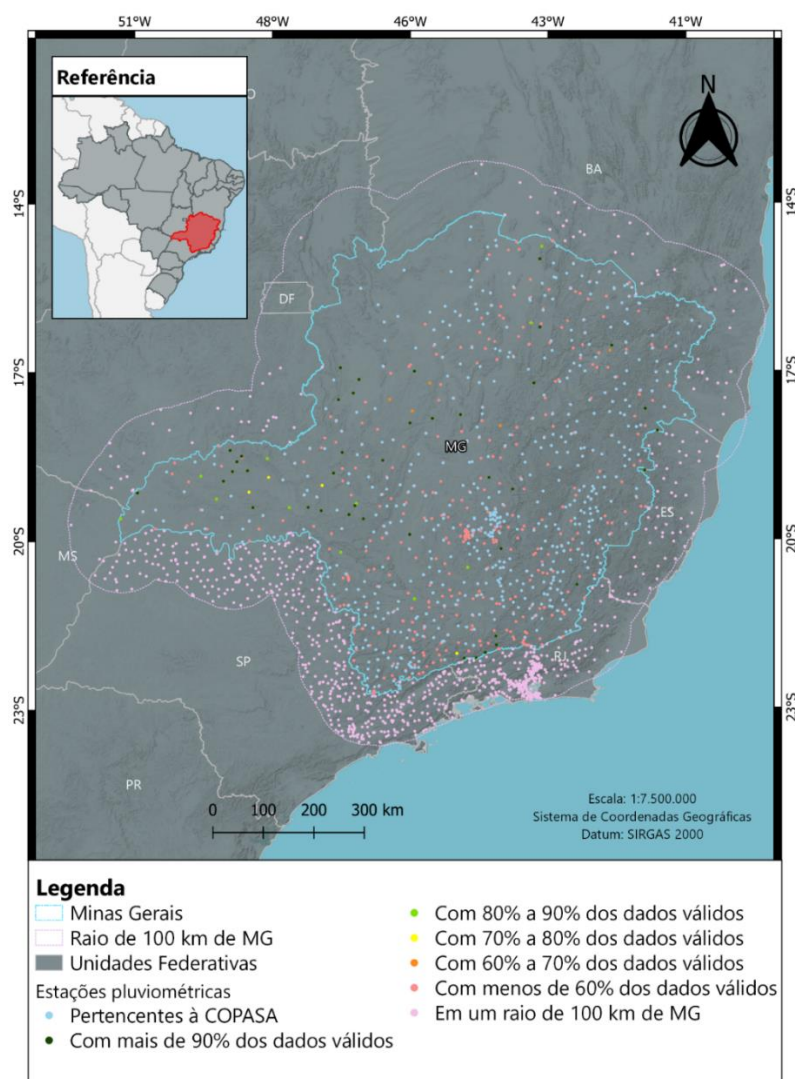


Figura 2. Mapa de localização, descrição e percentual de dados válidos das estações pluviométricas utilizadas nas interpolações por krigagem ordinária.

O tratamento dos dados válidos em *Python*, e o georreferenciamento destes de acordo com a estação pluviométrica possibilitaram a realização das interpolações em função dos menores erros no processo de krigagem ordinária. Foram criadas, assim, superfícies de precipitação mensal para o estado de Minas Gerais, em todos os meses do período estudado.

Entende-se que estas 252 superfícies de interpolação, por permitirem fornecer padrões de precipitação em todo o território de Minas Gerais,

podem servir, regionalmente, como importante instrumento na gestão agrícola, modelagem hidrológica, estudos de previsibilidade de risco geológico, e outros estudos que utilizam a precipitação como dado de entrada (Kisi et al., 2019; Cassiraga et al., 2021; Silva et al., 2021).

Exemplos destas superfícies de precipitação, interpoladas por modelos de krigagem ordinária, podem ser vistos na Figura 3.

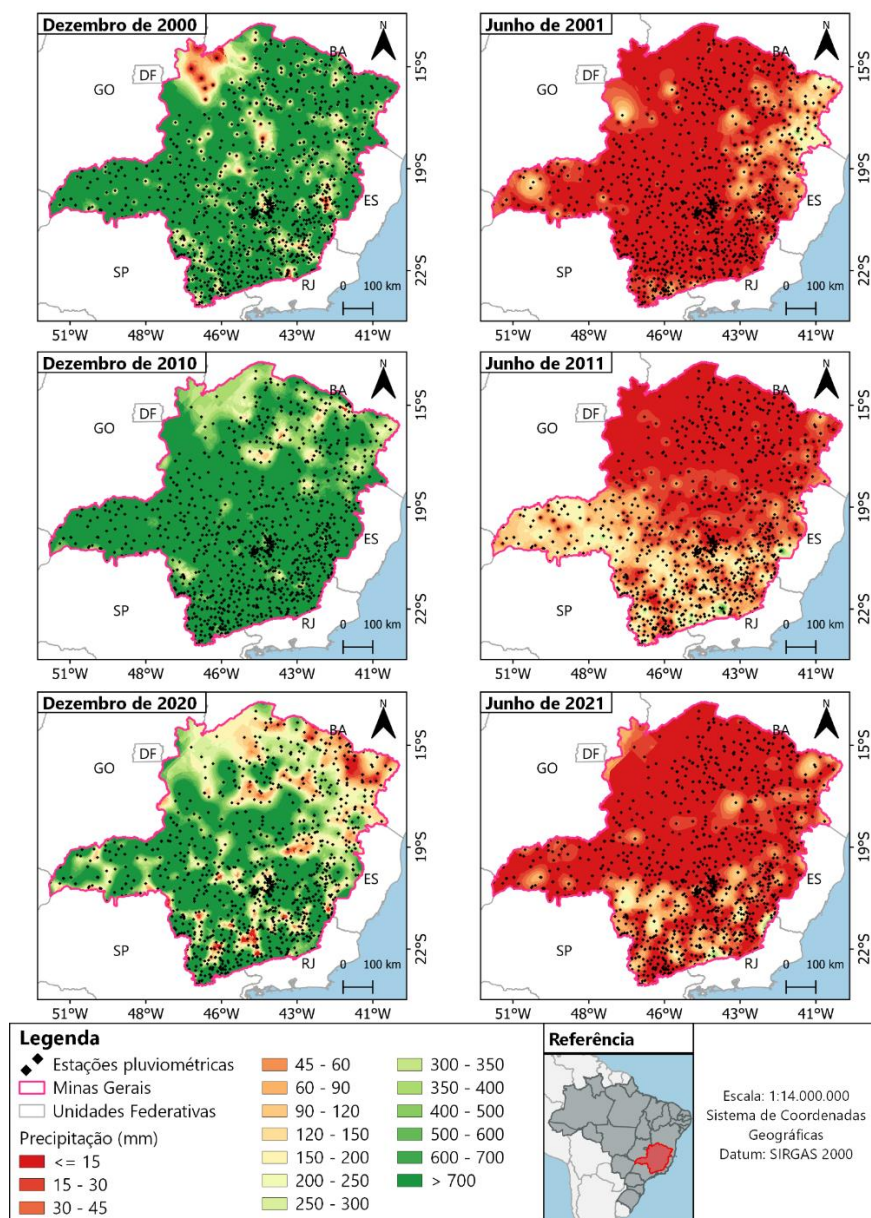


Figura 3. Exemplos de superfícies de precipitação interpoladas por krigagem ordinária no período chuvoso (dezembro) e seco (junho), entre os anos hidrológicos de outubro de 2000 a setembro de 2021.

Todas as interpolações obtiveram um Erro Padronizado Médio entre 0,37 e 1,31, apontando para a alta acurácia dos modelos geoestatísticos, já que estes valores representam uma proximidade do valor estimado ao valor previsto (Reza et al., 2019; Selmy et al., 2022).

Assim, a quantificação da frequência de utilização de cada modelo em toda série histórica, e por estação do ano, se encontra presente na Tabela 1.

Tabela1. Frequência de utilização dos modelos geostatísticos para interpolação da precipitação por krigagem ordinária, entre os anos hidrológicos de outubro de 2000 a setembro de 2021.

Modelo	Em toda série histórica		Na estação chuvosa		Na estação seca	
	Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)
Circular	37	14,68	16	12,70	21	16,67
Esférico	15	5,95	8	6,35	7	5,56
Exponencial	42	16,67	22	17,46	20	15,87
Gaussiano	122	48,41	61	48,41	61	48,41
Pentaesférico	23	9,13	13	10,32	10	7,94
Tetraesférico	13	5,16	6	4,76	7	5,56
Total	252	100	126	100	126	100

Desta forma, o modelo Gaussiano se apresentou como aquele com maior aplicabilidade em toda série histórica, independentemente da estação do ano, tendo em vista os menores Erros Médios Padronizados encontrados na realização do processo de krigagem.

A maior aplicabilidade do modelo Gaussiano aponta para uma predominância da distribuição normal dos dados de precipitação, no estado de Minas Gerais, no período estudado. A melhor performance de tal modelo também foi encontrada no estudo da variabilidade de precipitação na região costeira do estado de Pernambuco, baseada em 39 estações pluviométricas, com no máximo de 20% de vazios de dados (Silva et al., 2021).

Esta melhor performance do modelo Gaussiano também é encontrada em outros estudos de interpolação de precipitação por geoestatística, com cenários semelhantes de distribuição e representatividade temporal dos dados (Millán-Vega et al., 2020; Pirani e Modarres, 2020; Cerón et al., 2021; Ghorbani et al., 2021).

Ao comparar os modelos por mês do ano, viu-se também que o Gaussiano se apresentou como o mais robusto, considerando a maior aplicação deste em relação aos outros. Com exceção dos anos hidrológicos de 2002 a 2005, 2014 a 2016, e de 2018 a 2019, o modelo Gaussiano foi o mais aplicado.

Em função do Erro Médio Quadrático Padronizado, viu-se que tal modelo tende a

superestimar os valores de precipitação em toda série histórica, o que ocorreu em 70 das 122 vezes em que foi aplicado.

O mesmo aconteceu na estação seca, onde 40 das 61 vezes em que foi aplicado tenderam a superestimar a precipitação. Em relação à estação chuvosa, o mesmo não ocorreu, considerando a tendência a subestimar a precipitação em 31 das 61 vezes utilizado.

Em termos de aplicabilidade, os modelos Exponencial e Circular foram aqueles que sucederam o Gaussiano, considerando, em toda série histórica, as frequências de utilização de 42 vezes para o primeiro, e de 37 vezes para o segundo.

Entende-se que o fato do modelo Exponencial ter sido o segundo melhor deve-se à sua semelhança ao modelo Gaussiano, que apresenta o diferencial do desvio da variância do efeito pepita ser mais suave (Millán-Vega et al., 2020; Subyani, 2019). Tal semelhança entre os modelos Exponencial e Gaussiano também foi verificada na interpolação de precipitação anual na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, entre os anos de 1989 a 2018 (Oliveira et al., 2022).

Houve uma semelhança entre o desempenho dos modelos Circular e Exponencial, também verificada por Machiwal et al. (2020), ao analisar a estabilidade de séries históricas de precipitação no oeste da Índia, durante 50 anos.

Em relação ao total de vezes aplicado, o modelo Exponencial se mostrou mais recomendável para estações chuvosas, pelas 22 em que foi empregado, e o modelo Circular mais robusto nas estações secas, por suas 21 vezes utilizado.

Ambos os modelos tenderam a subestimar os valores de precipitação em toda série histórica e na estação chuvosa, sendo que o modelo Circular também fez o mesmo na estação seca, considerando a tendência a subestimar os valores em 11 das 10 vezes em que foi aplicado. Já o modelo Exponencial tendeu a superestimar os valores de precipitação na estação seca, em 13 das 20 vezes empregado.

O modelo Exponencial foi o mais aplicado no ano hidrológico de 2004 a 2005, junto com o Gaussiano, sendo ambos utilizados 4 vezes, e, junto com o Pentaesférico, o mais utilizado no ano hidrológico de 2018 a 2019, onde cada um foi empregado também 4 vezes. Para o ano hidrológico de 2014 a 2015, o modelo Circular foi o mais aplicado, e, junto com o modelo Gaussiano, o mais robusto para o ano hidrológico de 2015 a 2016.

O modelo Exponencial foi o segundo mais utilizado para os meses de janeiro, dezembro e de julho a setembro, enquanto o modelo Circular foi o segundo mais utilizado para os meses de abril a junho. Os modelos Exponencial e Circular apresentaram desempenhos iguais nos meses de setembro e outubro, sendo os mais utilizados após o Gaussiano.

Representando 9,13% da frequência de utilização em toda série histórica, o modelo Pentaesférico se mostrou como o quarto mais robusto, tendendo a subestimar os valores de precipitação em toda série histórica e no período chuvoso, em função do Erro Médio Quadrático Padronizado, e de superestimar no período chuvoso.

Embora existam registros da aplicação satisfatória do modelo Pentaesférico para análise de precipitação (Júnior et al., 2020; Pirani e Modarres, 2020), este não é indicado para tal finalidade (Wong e Kwon, 2021). Tal modelo apresenta mais bem resultados para mapeamento de propriedades do solo (Neto et al., 2020a; Selmy et al., 2020; Yusuf et al., 2020; Behera et al., 2021; Selmy et al., 2022; Shashikumar et al., 2022), e qualidade de águas subterrâneas (Khorrami, 2019; Said e Yurtal, 2019; Salem et al., 2022).

Assim, o modelo Pentaesférico subestimou, no geral, 15 das 23 vezes em que foi empregado, e, no período chuvoso, 11 das 13 vezes utilizado, tendendo a superestimar em 4 das 10 vezes

utilizado no período seco. Este modelo apresentou maior aplicabilidade no período chuvoso, considerando as 13 vezes empregado, em relação às 10 vezes em que foi aplicado nas estações secas.

Tal modelo se apresentou como o melhor para o ano hidrológico de outubro de 2002 a setembro de 2003, sendo aplicado 4 vezes, e como o segundo melhor para os anos de 2000 a 2001, utilizado 3 vezes, e de 2018 a 2019, utilizado 4 vezes. O modelo Pentaesférico também se mostrou, junto com o Tetraesférico, o segundo melhor para o ano de 2001 a 2002, sendo ambos utilizados duas vezes. Tal cenário se repetiu no ano hidrológico de 2014 a 2015, onde junto com o modelo Gaussiano, foi empregado 4 vezes.

O modelo Pentaesférico não foi robusto o suficiente para ser empregado nos meses de maio e outubro, não sendo utilizado também nos anos hidrológicos de 2003 a 2004, de 2006 a 2012, de 2016 a 2018, e de 2019 a 2021.

Representando 5,95% das krigagens, o modelo Esférico se apresentou como o penúltimo mais robusto, sendo mais aplicável em estações chuvosas, tendo em vista a frequência de 8 aplicações nestas, contra 7 no período seco.

Este modelo apresenta aplicabilidade quando não há significativa relação espacial entre as estações pluviométricas (Subyani, 2019). Houve um baixo desempenho deste modelo para Minas Gerais, mesmo existindo aplicabilidade deste nos climas semiárido (Oliveira et al., 2022) e amazônico (Millán-Vega et al., 2020), assim como no estado do Tocantins (Neto et al., 2020b) e do Mato Grosso (Cerón et al., 2021), e em outros países (Machiwal et al., 2020; Benavides-Bravo et al., 2021; Bati et al., 2022).

Tal modelo tendeu a subestimar os valores em 11 das 15 vezes aplicado, tendo o mesmo comportamento no período chuvoso, onde subestimou a precipitação em 7 das 8 vezes utilizado. Já no período seco, tal modelo tendeu a superestimar os valores de precipitação.

O modelo Esférico se apresentou como o segundo mais aplicado nos anos hidrológicos de 2003 a 2004, onde foi utilizado duas vezes, assim como o Tetraesférico, sendo também o segundo mais empregado entre os anos de 2010 a 2011 onde, similarmente ao modelo Circular, foi aplicado uma única vez. O modelo Esférico não foi utilizado nos meses de abril, maio, agosto e outubro, sendo que o mesmo ocorreu para os anos hidrológicos de 2000 a 2001, 2007 a 2009, 2013 a 2015, 2016 a 2018 e 2020 a 2021.

Sendo aplicado apenas 13 vezes entre as 252 krigagens, o equivalente à 5,16% de todas as

interpolações, o modelo Tetraesférico se mostrou como o menos aplicável à estimativa de precipitação no estado de Minas Gerais por técnicas de geoestatística.

Esta baixa performance do modelo se dá por este ser mais aplicável em outras variáveis ambientais, destacando, assim como no modelo Pentaesférico, seu maior ajuste à análise de solos (Neto et al., 2020a; Selmy et al., 2020; Yusuf et al., 2020; Selmy et al., 2022; Shashikumar et al., 2022) e de qualidade de águas subterrâneas (Khorrami, 2019; Said e Yurtal, 2019; Salem et al., 2022).

Tal modelo tendeu a subestimar os valores em toda série histórica, tendo em vista as 10 vezes em que isto ocorreu, sendo que o mesmo aconteceu para a estação chuvosa, onde 5 das 6 vezes aplicado subestimaram os valores de precipitação. O modelo apresentou o mesmo comportamento na estação

seca. Este foi o único modelo que não apresentou maior aplicabilidade para uma estação específica do ano.

O modelo Tetraesférico não se apresentou como robusto o suficiente para ser aplicado nos meses de janeiro, fevereiro, abril, e maio, bem como para os anos hidrológicos de 2002 a 2003, 2006 a 2008, 2010 a 2011, 2012 a 2015, 2016 a 2017, 2018 a 2019, e de 2020 a 2021.

Em relação à análise da dependência espacial dos modelos, viu-se que 107 dos 252 apresentaram GDE alto, sendo este o equivalente a 42,46%, 104 GDE moderado, representando 41,26% de toda série histórica, e 41 um GDE fraco, configurando 16,26% das krigagens. A Tabela 2 quantifica a frequência dos diferentes graus de dependência espacial por modelo.

Tabela 2. Frequência de cada um dos Graus de dependência espacial por modelo de krigagem para interpolação de precipitação no estado de Minas Gerais.

Modelo	Grau de Dependência Espacial (GDE)					
	Alto		Moderado		Fraco	
	Frequência Absoluta	Em relação ao total do modelo (%)	Frequência Absoluta	Em relação ao total do modelo (%)	Frequência Absoluta	Em relação ao total do modelo (%)
Circular	17	45,95	18	48,65	2	5,41
Exponencial	22	52,38	15	35,71	5	11,90
Esférico	8	53,33	5	33,33	2	13,33
Tetraesférico	5	38,46	4	30,77	4	30,77
Pentaesférico	18	78,26	4	17,39	1	4,35
Gaussiano	37	30,33	58	47,54	27	22,13

Portanto, os modelos tiveram uma variação de GDE que aponta para uma relação irregular entre a dependência estatística dos valores georreferenciados de precipitação e a aplicabilidade em função dos seus erros no processo de predição por krigagem.

A predominância de modelos com moderada a forte dependência espacial está de acordo com outras regiões do Brasil (Mello e Sampaio, 2019; Neto et al., 2020c; Prólo et al., 2021). Entende-se também que a adoção de recortes espaciais menores que a escala adotada no trabalho poderia gerar modelos com predominância de um grau de dependência espacial forte (Comisso e Medeiros, 2021).

Assim, na escala analisada, a distância é colocada como uma variável importante na definição da qualidade dos diferentes modelos de krigagem ordinária, mas não como o único ou

principal definidor do desempenho dos modelos de semivariograma.

Neste sentido, modelos mais complexos, com inserção de outras variáveis meteorológicas, como umidade, velocidade do vento, pressão atmosférica, insolação, cobertura de nuvens, e frequência de chuvas podem gerar produtos mais assertivos para todo o estado (Andrade et al., 2021; Medeiros et al., 2022). Entende-se, no entanto, que modelos mais complexos requerem uma maior capacidade computacional, além de uma maior disponibilidade e necessidade de tratamento de dados.

Conclusões

Este trabalho constatou a baixa disponibilidade e concentração de dados públicos de precipitação no estado, passando pela verificação da

aplicabilidade de diferentes modelos de krigagem ordinária para estimativa de precipitação em Minas Gerais.

Viu-se que o modelo mais robusto é o Gaussiano, independentemente da estação do ano, sendo sucedido pelo modelo Exponencial, melhor aplicado no período chuvoso, e pelo modelo Circular, mais indicado para interpolações na estação seca.

Os modelos Pentaesférico, Esférico e Tetraesférico foram os menos aplicados, representando 20,24% das krigagens. O modelo Tetraesférico se apresentou como aquele com menor funcionalidade para interpolação de precipitação mensal em Minas Gerais, não sendo indicado para tal processo.

Também foram verificadas as especificidades de cada modelo de acordo com a estação e o mês. Destacou-se também que os graus de dependência espacial dos modelos não apontam para a distância como elemento único ou principal na definição do desempenho dos diferentes tipos de krigagem.

A maior aplicabilidade por modelo aqui exposta poderá servir como orientação para trabalhos de outros autores.

Viu-se que, na série histórica, a utilização exclusiva de dados públicos não é recomendável para estimativa precisa de precipitação por krigagem ordinária, principalmente nas regiões Norte e Oeste.

Recomenda-se a realização de trabalhos futuros que incluam na predição da precipitação outras variáveis, considerando as particularidades ambientais do estado de Minas Gerais, e que possam verificar o grau de dependência espacial em recortes territoriais menores.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), por ceder os dados e a estrutura necessária para realização do trabalho.

Referências

Almeida, R.A., Coelho, G., Almeida, I.A., de Oliveira Costa, J., 2018. Geoestatística aplicada na estimativa de chuvas máximas diárias no estado de Minas Gerais. *Nativa* [online] 6. Disponível: <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i6.5830>. Acesso: 01 fev. 2022.

Amini, M.A., Torkan, G., Eslamian, S., Zareian, M.J., Adamowski, J.F., 2019. Analysis of deterministic and geostatistical interpolation techniques for mapping meteorological

variables at large watershed scales. *Acta Geophysica* [online] 67. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0226-y>. Acesso: 13 out. 2022.

Alves, G. J., Mello, C. R., Guo, L.; Thebaldi, M. S., 2022. Natural disaster in the mountainous region of Rio de Janeiro state, Brazil: Assessment of the daily rainfall erosivity as an early warning index. *International Soil and Water Conservation Research* [online] 10. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.02.002>. Acesso: 15 mai. 2022.

Andrade, A.R.S., Silva, E.G., dos Passos Vieira, A., Silva, M.B.G., dos Santos, W.M., dos Santos Silva, M.G., 2021. Análise fatorial na identificação dos fatores para obtenção de índice climatológico. *Journal of Environmental Analysis and Progress* [online] 6. Disponível: <https://doi.org/10.24221/jeap.6.1.2021.3270.07> 9-099. Acesso: 16 out. 2022.

Bati, H.G., Tegaye, T.A., Agumassie, T.A., 2022. Performance assessment of interpolation techniques for optimal areal rainfall–temperature estimation: the case of two contrasting river catchments, Akaki and Mille, in Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change* [online] 13. Disponível: <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.089>. Acesso: 14 out. 2022.

Behera, S.K., Shukla, A.K., Prakash, C., Tripathi, A., Kumar, A., Trivedi, V., 2021. Establishing management zones of soil sulfur and micronutrients for sustainable crop production. *Land Degradation & Development* [online] 32. Disponível: <https://doi.org/10.1002/ldr.3698>. Acesso: 12 out. 2022.

Benavides-Bravo, F.G., Soto-Villalobos, R., Cantú-González, J.R., Aguirre-López, M.A., Benavides-Ríos, Á.G., 2021. A Quadratic–Exponential Model of Variogram Based on Knowing the Maximal Variability: Application to a Rainfall Time Series. *Mathematics* [online] 9. Disponível: <https://doi.org/10.3390/math9192466>. Acesso: 13 out. 2022.

Caram, R.O. 2007. Reconstrução de séries e análise geoestatística da precipitação no Estado de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado). Viçosa, UFV.

Ceron, W. L., Andreoli, R.V., Kayano, M.T., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y., Souza, R.A., 2021. Comparison of spatial interpolation methods for annual and seasonal rainfall in two hotspots of biodiversity in South America.

- Anais da Academia Brasileira de Ciências [online] 93. Disponível: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190674>. Acesso: 23 out. 2022.
- Cassiraga, E., Gómez-Hernández, J.J., Berenguer, M., Sempere-Torres, D., Rodrigo-Ilarri, J., 2021. Spatiotemporal precipitation estimation from rain gauges and meteorological radar using geostatistics. *Mathematical Geosciences* [online] 53. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11004-020-09882-1>. Acesso: 17 out. 2022.
- Charles, T.S., Lopes, T.R., Duarte, S.N., Nascimento, J.G., de Carvalho Ricardo, H., Pacheco, A.B., 2022. Estimating average annual rainfall by ordinary kriging and TRMM precipitation products in midwestern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* [online] 118. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103937>. Acesso: 15 out. 2022.
- Chutsagulprom, N., Chaisee, K., Wongsaijai, B., Inkeaw, P., Oonariya, C., 2022. Spatial interpolation methods for estimating monthly rainfall distribution in Thailand. *Theoretical and Applied Climatology* [online] 148. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00704-022-03927-7>. Acesso: 15 out. 2022.
- Comisso, H.S., de Medeiros, E.S., 2021. MAPEAMENTO DA PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DE ALAGOAS POR MEIO DE TÉCNICAS GEOESTATÍSTICAS. *Revista Univap* [online] 27. Disponível: <https://doi.org/10.18066/revistaunivap.v27i55.2580>. Acesso: 15 out. 2022.
- Dantas, G.D., Oliveira, L.A., 2021. Análise da continuidade espacial da precipitação na bacia hidrográfica do rio são francisco em sua área de ocorrência no estado de minas gerais-brasil, série histórica 2004 a 2017. *Brazilian Journal of Development* [online] 7. Disponível: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-190>. Acesso: 20 out. 2022.
- Dalagnol, R., Gramscianinov, C. B., Crespo, N.M., Luiz, R., Chiquetto, J.B., Marques, M.T.A., Neto, G.D., de Abreu, R.C., Li, S., Lott, F.C., Anderson, L.O., Sparrow, S., 2022. Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change? *Climate Resilience and Sustainability* [online] 1. Disponível: <https://doi.org/10.1002/cli2.15>. Acesso: 01 set. 2022.
- Felicio, T.N.P., Costa, T.L., Sarmento, R.A., Ramos, R.S., Pereira, P.S., Silva, R.S., Picanço, M.C., 2019. Surrounding vegetation, climatic elements, and predators affect the spatial dynamics of Bemisia tabaci (Hemiptera: Aleyrodidae) in commercial melon fields. *Journal of Economic Entomology* [online] 112. Disponível: <https://doi.org/10.1093/jee/toz181>. Acesso: 22 out. 2022.
- Ferreira, H.R., Tres, A., Tetto, A.F., Soares, R.V., Wendling, W.T., Batista, A.C., 2019. Classificação climática para o estado de Minas Gerais segundo as zonas de vida de Holdridge. *Journal of Biotechnology and Biodiversity* [online] 7. Disponível: <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v7n2.ferreira>. Acesso: 20 out. 2022.
- Getirana, A., Libonati, R., Cataldi, M., 2021. Brazil is in water crisis — it needs a drought plan. *Nature* [online] 600. Disponível: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-03625-w>. Acesso: 14 jan. 2022.
- Ghorbani, M.A., Mahmoud Alilou, S., Javidan, S., Naganna, S.R., 2021. Assessment of spatio-temporal variability of rainfall and mean air temperature over Ardabil province, Iran. *SN Applied Sciences* [online] 3. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04698-y>. Acesso: 24 out. 2022.
- Kisi, O., Mohsenzadeh Karimi, S., Shiri, J., Keshavarzi, A., 2019. Modelling long term monthly rainfall using geographical inputs: assessing heuristic and geostatistical models. *Meteorological Applications* [online] 26. Disponível: <https://doi.org/10.1002/met.1797>. Acesso: 22 out. 2022.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021. Áreas Territoriais. Disponível: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso: 27 mar. 2022.
- Jin, Y., O'Connor, D., Ok, Y.S., Tsang, D.C., Liu, A., Hou, D., 2019. Assessment of sources of heavy metals in soil and dust at children's playgrounds in Beijing using GIS and multivariate statistical analysis. *Environment international* [online] 124. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.024>. Acesso: 24 out. 2022.
- Júnior, S.F.A.X., Jale, J.D.S., Stosic, T., Santos, C.A.C.D., Singh, V.P., 2020. Precipitation trends analysis by Mann-Kendall test: a case study of Paraíba, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia* [online] 35. Disponível:

- <https://doi.org/10.1590/0102-7786351013>. Acesso: 18 out. 2022.
- Katusiime, J., Schütt, B., 2020. Integrated water resources management approaches to improve water resources governance. *Water* [online] 12. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w12123424>. Acesso: 12 out. 2022.
- Koop, S.H., Grison, C., Eisenreich, S.J., Hofman, J., van Leeuwen, K., 2022. Integrated water resources management in cities in the world: Global solutions. *Sustainable Cities and Society* [online] 86. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104137>. Acesso: 01 set. 2022.
- Khorrami, B., 2019. Monitoring the spatio-temporal trends of groundwater qualitative parameters through geostatistical tools. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences* [online] 37. Acesso: 12 out. 2022.
- Machiwal, D., Jha, M.K., Gupta, A., 2020. Development of a rainfall Stability Index using probabilistic indicators. *Ecological Indicators* [online] 115. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106406>, Acesso: 13 out. 2022.
- Marengo, J.A., Camarinha, P.I., Alves, L.M., Diniz, F., Betts, R.A., 2021. Extreme rainfall and hydro-geo-meteorological disaster risk in 1.5, 2.0, and 4.0° C global warming scenarios: an analysis for Brazil. *Frontiers in Climate* [online] 3. Disponível: <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.610433>. Acesso: 19 jan. 2022.
- Magerski, J.M., Virgens Filho, J.S.V., 2021. Avaliação da técnica de krigagem ordinária utilizando o modelo geoestatístico estável no preenchimento de falhas de séries de precipitação pluviométrica nas sub-bacias hidrográficas localizadas em regiões de classificação climática distintas no estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 14. Disponível: <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2149-2171>. Acesso: 18 out. 2022.
- Medeiros, R.M., Saboya, L.M.F., Cunha Filho, M., de França, M.V., de Araújo, W.R., de Holanda, R.M., 2022. Estudos dos fatores meteorológicos na bacia hidrográfica do rio Uruçuí Preto. *Research, Society and Development* [online] 11. Disponível: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.27775>. Acesso: 16 out. 2022.
- Mello, Y.R., Sampaio, T.V.M., 2019. Análise geoestatística da precipitação média para o estado do Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia* [online] 25. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v25i0.64468>. Acesso: 18 out. 2022.
- Millán-Vega, H., Rabelo-Lima, J., Valderá-Figueroa, N., 2020. Spatial structure of precipitation in the Brazilian Amazonia: geostatistics with block kriging. *Revista Cubana de Meteorología* [online] 26. Acesso: 21 out. 2022.
- Miranda, G.M., 2020. Motivações e desafios para a implementação da gestão integrada de recursos hídricos em federações: os casos brasileiro e suíço. *Revista De Gestão De Água Da América Latina* [online] 17. Disponível: <https://dx.doi.org/10.21168/reg.v17e6>. Acesso: 12 out. 2022.
- Miranda, R.L., Martins, E.M., Lopes, K., 2019. A potencialidade energética da biomassa no Brasil. *Desenvolvimento Socioeconômico em Debate* [online] 5. Disponível: <https://doi.org/10.18616/rdsd.v5i1.4829>. Acesso: 12 out. 2022.
- Mota, V.C., 2020. Geoestatística bidimensional como alternativa à modelagem de séries temporais sob cenários de mudanças climáticas. *Pubvet* [online] 15. Disponível: <https://doi.org/10.31533/pubvet.v15n02a745.1-9>. Acesso: 18 out. 2022.
- Neto, E.A., Junior, E.S., Oliveira, M.S.D., 2020a. Geostatistical-based index for spatial variability in soil properties. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online] 44. Disponível: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200086>. Acesso: 14 out. 2022.
- Neto, V.L.S., Viola, M.R., Mello, C.R., Alves, M.V.G., Silva, D.D., Pereira, S.B., 2020b. Mapeamento de Chuvas Intensas para o Estado do Tocantins. *Revista Brasileira de Meteorologia* [online] 35. Disponível: <https://doi.org/10.1590/0102-7786351017>. Acesso: 13 out. 2022.
- Neto, V.L.S., Batista, E.D., Leal Junior, W.B., Fabris, Z.V., Rodrigues, P.J.A.W., 2022c. Distribuição espacial da erosividade das chuvas na bacia do rio Manuel Alves da Natividade, Tocantins. *Sociedade & Natureza* [online] 32. Disponível: <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-46182>. Acesso: 15 out. 2022.
- Oriani, F., Stisen, S., Demirel, M.C., Mariethoz, G., 2020. Missing data imputation for multisite rainfall networks: a comparison between geostatistical interpolation and pattern-based estimation on different terrain types. *Journal of Hydrometeorology* [online] 21. Disponível:

- <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0220.1>. Acesso: 14 out. 2022.
- Pereira, M.A.F., Barbieiro, B.L., Quevedo, D.M., 2022. Importância do monitoramento e disponibilização de dados hidrológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos. *Sociedade & Natureza* [online] 32. Disponível: <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-43458>. Acesso: 22 mai. 2022.
- Pirani, F.J, Modarres, R., 2020. Geostatistical and deterministic methods for rainfall interpolation in the Zayandeh Rud basin, Iran. *Hydrological Sciences Journal* [online] 65. Disponível: <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1833014>. Acesso: 13 out. 2022.
- Profeta, A.L., 2016. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA PARA A ESTIMATIVA DA SUPERFÍCIE DE PRECIPITAÇÃO EM MINAS GERAIS. *Cadernos do LESTE* [online] 16. Disponível: <https://doi.org/10.29327/249218.16.16-1>. Acesso: 25 mar. 2022.
- Prólo, T.T., Neto, V.L.S., do Carmo, E.L., Junior, O.S., da Silva, L.L., 2021. Chuvas intensas na bacia do rio Manuel Alves da Natividade, Tocantins, Brasil. *Research, Society and Development* [online] 10. Disponível: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12673>. Acesso: 13 out. 2022.
- Reza, S.K., Dutta, D., Bandyopadhyay, S., Singh, S.K., 2019. Spatial variability analysis of soil properties of Tinsukia District, Assam, India. *Agricultural Research* [online] 8. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0365-z>. Acesso: 19 out. 2022.
- Said, A.A., Yurtal, R., 2019. Spatial groundwater quality assessment using geostatistics in Puntland, Somalia. *Int. J. Sci. Technol. Res* [online] 5.
- Salem, I.B., Nazzal, Y., Howari, F.M., Sharma, M., Mogaraju, J.K., Xavier, C.M., 2022. Geospatial Assessment of Groundwater Quality with the Distinctive Portrayal of Heavy Metals in the United Arab Emirates. *Water* [online] 14. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w14060879>. Acesso: 13 out. 2022.
- Santos, P.A.B.D., Monti, C.A.U., Carvalho, L.G.D., Lacerda, W.S., Schwerz, F., 2021. Air temperature estimation techniques in Minas Gerais state, Brazil, Cwa and Cwb climate regions according to the Köppen-Geiger climate classification system. *Ciência e Agrotecnologia* [online] 45. Disponível: <https://doi.org/10.1590/1413-73752021000300005>. Acesso: 24 out. 2022.
- Shashikumar, B.N., Kumar, S., George, K.J., Singh, A.K., 2022. Soil variability mapping and delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a Mid-Himalayan Watershed, India. *Environment, Development and Sustainability*. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02411-6>. Acesso: 13 out. 2022.
- Selmy, S., El-Aziz, A., El-Desoky, A., El-Sayed, M., 2022. Characterizing, predicting, and mapping of soil spatial variability in Gharb El-Mawhoub area of Dakhla Oasis using geostatistics and GIS approaches. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* [online] 21. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.10.013>. Acesso: 23 out. 2022.
- Selmy, S., El-Aziz, A., Gameh, M., Abdelsalam, A.S., 2020. Characterization and mapping spatial variability of Entisols derived from shale in Dakhla Oasis, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences* [online] 13. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05540-2>. Acesso: 13 out. 2022.
- Secondi, L., 2021. Estimating Household Consumption Expenditure at Local Level In Italy: The Potential of the Cokriging Spatial Predictor. *Social Indicators Research* [online] 153. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11205-020-02510-9>. Acesso: 21 out. 2022.
- Servidoni, L.E., Teodoro, A. E.M., Mincato, R L., dos Santos, C.A., 2019. Avaliação de risco a enchentes e inundações por krigagem ordinária em sistemas de informação geográfica. *Caderno de Geografia* [online] 29. Disponível: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29nespp126>. Acesso: 16 out. 2022.
- Sahu, B., Ghosh, A.K., 2021. Deterministic and geostatistical models for predicting soil organic carbon in a 60 ha farm on Inceptisol in Varanasi, India. *Geoderma Regional* [online] 26. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00413>. Acesso: 14 out. 2022.
- Silva, H.M., Sarnighausen, V.C.R., 2021. Análise geoestatística de séries temporais de temperatura do ar, evapotranspiração de referência e precipitação pluvial. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais* [online] 12. Disponível: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0056>. Acesso: 21 out. 2022.

- Silva, M.V., Pandorfi, H., Jardim, A.M.D.R.F., Oliveira-Júnior, J.F., Divincula, J.S., Giongo, P. R., Silva, T.G.F., Almeida, G.L.P., Lopes, P.M.O., 2021. Spatial modeling of rainfall patterns and groundwater on the coast of northeastern Brazil. *Urban Climate* [online] 38. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100911>. Acesso: 21 out. 2022.
- Subyani, A.M., 2019. Climate variability in space-time variogram models of annual rainfall in arid regions. *Arabian Journal of Geosciences* [online] 12. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4836-8>. Acesso: 24 out. 2022.
- Tzanakakis, V.A., Paranychianakis, N.V., Angelakis, A.N., 2020. Water supply and water scarcity. *Water* [online] 12. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w12092347>. Acesso: 12 out. 2022.
- Viana, R.S.M., Santos, G.R., Moreira, D.S., Louzada, J.M., Rosa, L.M.F., 2019. O Uso da Geoestatística Espaço-Temporal na Predição da Temperatura Máxima do Ar (The Use of Space-Temporal Geostatistics in the Prediction of Maximum Air Temperature). *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 12. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p096-111>. Acesso: 19 out. 2022.
- Wong, A.H., Kwon, T.J., 2021. Development and evaluation of geostatistical methods for estimating weather related collisions: a large-scale case study. *Transportation research record* [online] 2675. Disponível: <https://doi.org/10.1177/03611981211020008>. Acesso: 14 out. 2022.
- Xavier, A., Bentes, N.M.S., 2020. Limites, desafios e oportunidades de participação na gestão de recursos hídricos: Uma análise do marco jurídico internacional e uma revisão integrativa da literatura sobre participação nos comitês de bacias hidrográficas brasileiros. *Direito Público* [online] 17. Acesso: 12 out. 2022.
- Yannopoulos, S., Giannopoulou, I., Kaiafa-Saropoulou, M., 2019. Investigation of the current situation and prospects for the development of rainwater harvesting as a tool to confront water scarcity worldwide. *Water* [online] 11. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w11102168>. Acesso: 12 out. 2022.
- Yusuf, B.L., Mustapha, A., Yusuf, M.A., Ahmed, M., 2020. Soil salinity assessment using geostatistical models in some parts of Kano River Irrigation Project Phase I (KRPI). *Modeling Earth Systems and Environment* [online] 6. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00841-7>. Acesso: 12 out. 2022.
- Zhao, K., Zhang, L., Dong, J., Wu, J., Ye, Z., Zhao, W., Ding, L., Fu, W., 2020. Risk assessment, spatial patterns and source apportionment of soil heavy metals in a typical Chinese hickory plantation region of southeastern China. *Geoderma* [online] 360. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114011>. Acesso: 19 out. 2022.