Revista Brasileira de Geografia Física

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

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

Juliane Macedo Magerski¹, Jorim Sousa das Virgens Filho²

¹ MSc. em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Estadual de Ponta Grossa, Av. Gal Carlos Cavalcanti, 4748, Uvaranas, CEP 84030900, Ponta Grossa, Paraná. engjuliane.mm@gmail.com. ² Professor Associado, Departamento de Matemática e Estatística, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Av. Gal Carlos Cavalcanti, 4748, Uvaranas, CEP 84030900, Ponta Grossa, Paraná. (42) 3220-3049. jvirgens@uepg.br. (autor correspondente).

Artigo recebido em 14/02/2021 e aceito em 16/07/2021

RESUMO

O monitoramento hidroclimatológico é de grande relevância nos problemas que envolvem questões socioeconômicas e ambientais. Nesse contexto, a precipitação pluviométrica é um fator impactante no inter-relacionamento entre clima e hidrografia, sendo importante a avaliação de suas características locais e distribuição espaço-temporal que auxilia no planejamento territorial urbano. Esta pesquisa objetivou avaliar a técnica de krigagem ordinária, utilizando o modelo geoestatístico estável no preenchimento de falhas em séries mensais de precipitação, bem como analisar sua espacialização nos períodos sazonais e anual nas sub-bacias hidrográficas do Alto Rio Tibagi e do Baixo Rio Ivaí, localizadas em regiões climaticamente distintas no Estado do Paraná. Foram utilizados dados mensais de postos pluviométricos pertencentes ao Instituto Águas Paraná, INMET e IAPAR no período de 1974-2018. O software ArcGis foi usado para interpolação e geração dos mapas georreferenciados e, uma análise estatística para verificação da eficiência da modelagem foi conduzida por meio do teste de Wilcoxon a 5% e das estatísticas EMA, REQm, índices r , d (Willmott) e NS (Nash-Sutcliffe). De maneira geral, as classes de precipitação foram representadas similarmente nos mapas gerados com os dados observados e preenchidos pelo modelo estável. A análise estatística apontou uma boa eficiência da modelagem nos períodos sazonais e anual, mostrando valores relativamente baixos de EMA e REQm, assim como valores expressivos dos índices r , d e NS, principalmente, na sub-bacia do Alto Rio Tibagi. Apesar das sub-bacias estarem em regiões climáticas distintas, não foram constatadas anomalias motivadas por fatores locais no processo de modelagem e espacialização dos dados.

Palavras-chave: recursos hídricos, geoestatística, hidroclimatologia, espacialização de dados pluviométricos.

Assessment of the ordinary kriging technique using the stable geostatistical model in filling gaps of rainfall series in hydrographic sub-basins located in different climate classification regions in the state of Parana

ABSTRACT

Hydroclimatological monitoring is of great relevance in problems involving socioeconomic and environmental issues. In this context, rainfall is an impacting factor in the interrelationship between climate and hydrography, and it is important to evaluate its characteristics and spatiotemporal distribution that help in urban territorial planning. This research aimed to assess the ordinary kriging technique, using the stable geostatistical model in filling gaps in monthly rainfall series, as well to analyze its spatialization in seasonal and annual periods in the hydrographic sub-basins of the Upper Tibagi River and the Lower Ivaí River, located in climatically distinct regions in the State of Parana. Monthly data of rainfall stations belonging to the Instituto Aguas Parana, INMET and IAPAR from 1974 to 2018 were used. ArcGis software was used for interpolation and generation of georeferenced maps, and a statistical analysis to verify the efficiency of the modeling, was conducted using the Wilcoxon test at 5% and EMA, REQm, r , d (Willmott), NS (Nash-Sutcliffe) statistics. In general, the rainfall classes were similarly represented in the maps generated with observed data and filled by the stable model. The statistical analysis showed a good efficiency of the modeling in the seasonal and annual periods, presenting relatively minimum values of EMA and REQm, as well as expressive values of the indexes r , d and NS, mainly, in the sub-basin of the Upper Tibagi River. Although the sub-basins are located in different climatic regions, anomalies due to local factors were not found in the data modeling and spatialization process.

Keywords: water resources, geostatistics, hydroclimatology, spatialization of data rainfall.

Introdução

O conhecimento das condições climáticas e hidrológicas de longo tempo, permeia aspectos fundamentais no progresso da população humana, em especial no processo de urbanização. Com o crescimento das atividades econômicas baseadas em sustentabilidade, algumas áreas estratégicas das atividades humanas como a agricultura, a gestão de recursos hídricos e a ecologia necessitam de informações hidroclimatológicas para auxílio na tomada de decisões.

Entende-se o clima como um conjunto de condições atmosféricas médias que caracteriza uma região, que de acordo com Santos et al. (2018), se constitui uma das características do sistema humano-natural influenciando os sistemas vivos da terra. Nesse contexto, visando auxiliar estudos envolvendo o clima, são empregados Sistemas de Classificação Climática (SCC), os quais objetivam sintetizar as características climáticas de um dado local, ajudando a identificar espacialmente as áreas com características climáticas similares (Martins et al., 2018). O SCC de Köppen (Köppen e Geiger, 1928) é um dos mais aplicados e se utiliza de dados mensais de temperatura do ar e da precipitação pluviométrica média em sua concepção.

A avaliação conjunta de fatores hidrológicos e climáticos favorece de maneira positiva na elaboração de políticas de gestão hídrica, uma vez que pode proporcionar, a criação de alertas que ajudam a precaver uma comunidade ou população de grandes imprevistos que afetem o patrimônio natural, seja em escala local ou regional.

Apesar das pesquisas que utilizam fatores hidroclimatológicos serem aplicadas em áreas que podem considerar alguns tipos de critérios na delimitação da área analisada, como limites municipais e estaduais, as bacias hidrográficas são as áreas preferencialmente utilizadas para o estudo do ciclo hidrológico. Inclusive, dentro desta abordagem, a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), lei nº 9.4330 (BRASIL, 1997), também conhecida como a Lei das Águas, tem como quinto fundamento, que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implementação da PNRH e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Freire e Baldo (2017) sintetizam a justificativa de vários autores ao trabalharem com bacias hidrográficas como base para análises ambientais, considerando o ciclo hidrológico, no qual a precipitação é a entrada efetiva de água na bacia hidrográfica que tem uma grande quantidade convertida para um único ponto de menor cota da

área, ou seja, a precipitação que incide na área pode contribuir em toda extensão do rio e, consequentemente, em toda a bacia hidrográfica.

A precipitação pluviométrica é a forma mais importante de precipitação e, também, um dos principais elementos do ciclo hidrológico, visto que desempenha um papel importante no intercâmbio de energia e na circulação de material no sistema de superfície da Terra (Fatemi et al., 2018).

De acordo com Lemos et al. (2018), esse fenômeno climático nos ambientes tropicais e subtropicais representa o principal aporte atmosférico de água, que constitui recurso essencial para a vida e para as atividades humanas. Portanto, é essencial entender suas características, assim como sua distribuição espaço-temporal para apoiar a formulação de medidas específicas de políticas públicas e a implementação de políticas econômicas (Silva et al., 2018).

A pluviosidade também é associada aos maiores impactos sociais e econômicos, podendo ser relacionados a excesso, como inundações, ou escassez, como as secas (Nascimento et al., 2021; Gouvea et al., 2019, Pereira et al., 2018gg). Vieira et al. (2020) afirmam que o conhecimento sobre o fenômeno influencia no desenvolvimento de várias culturas, assim como tem importância para obras hidráulicas e urbanas cujo objetivo é projetar a estrutura de tal forma que ela resista ocorrências de precipitação extrema

Molina-Sanchis et al. (2016), explicam que a maioria dos estudos que relacionam precipitação e hidrologia, classificam as chuvas em eventos, o que não é algo simples visto que a distribuição da precipitação no tempo é altamente irregular.

Sardinha et al. (2016) afirmam que estudos hidroclimatológicos são ferramentas que compõem o planejamento urbano, a fim de atuarem por meio da mitigação e adaptação, principalmente no tocante aos desastres naturais, que podem causar perturbação no funcionamento de uma comunidade ou de uma sociedade ao envolver perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais de grande extensão, afetando a capacidade da comunidade ou da sociedade de arcar com seus próprios recursos.

O monitoramento das variáveis hidroclimatológicas é uma ferramenta necessária para gestão dos recursos hídricos, que é essencial para o seu gerenciamento. Siqueira, Nery e Martins (2018) entendem que os dados pluviométricos no Brasil ainda são muito inconsistentes, sendo corroborados por Bielenki Junior et al. (2018) que explicam que é comum encontrar falhas, seja por

falta de observador, erros nos mecanismos de registro, perda de anotações e dados ou na transcrição dos registros feitos pelos operadores, e também pelo fechamento de pontos de observação.

Entretanto, a maioria das aplicações exige séries completas, sendo necessário o preenchimento das falhas que, dependendo da porcentagem das mesmas, podem resultar em valores que apresentam pouca conformidade com a realidade.

Bielenki Junior et al. (2018) relatam dificuldades em encontrar estações climatológicas com séries históricas relativamente longas e sem falhas, sendo uma situação comum principalmente em bacias com baixo potencial hídrico e pouco urbanizadas.

Há uma variedade de métodos para o preenchimento destas lacunas de dados. Um dos métodos mais conhecidos para a estimativa de dados pluviométricos é o Polígono de Thiessen, porém, de acordo com Marciano et al. (2018), este método não produz resultados satisfatórios para aplicação em terrenos acidentados.

Bier e Ferraz (2017) realizaram um estudo na região sul do Brasil onde avaliaram algumas das várias metodologias de preenchimento de falhas de pluviosidade, como a média aritmética simples (MA), a regressão linear múltipla (RLM), a ponderação regional (PR) e a interpolação geoestatística do inverso da distância ponderada (IDP), também conhecida pela sigla em inglês *IDW- Inverse Distance Weighted*. Todos os métodos aplicados utilizaram dados dos postos meteorológicos vizinhos mais próximos para o preenchimento das séries e nenhum deles se apresentou como satisfatório para utilização na região avaliada.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), são muito utilizados para a manipulação de séries históricas de dados geoespacializados. Segundo o IBGE (2019), um dado georreferenciado, é aquele em que a dimensão espacial está associada à sua localização na superfície terrestre, em determinado instante ou período de tempo e juntamente às coordenadas geográficas ou cartográficas, onde se encontra o conhecimento científico sobre um elemento. Entende-se que o conhecimento dos pontos amostrados e modelo de interpolação utilizados influencia diretamente na qualidade de uma interpolação (Vargas et al., 2018)

Sendo assim, para que esses dados sejam utilizados de maneira efetiva em uma área, é necessário que haja a representação de dados pontuais gerando um produto em forma de grade, utilizando-se de técnicas de interpolação espacial (Bortoluzzi, 2019).

O processo de interpolação se baseia no raciocínio de que, em média, o valor do atributo em um determinado ponto não amostrado, tende a ser semelhante aos valores encontrados em pontos mais próximos do que os valores observados em locais mais distantes (Morais e Araújo, 2015).

A interpolação pode ser classificada de várias formas, em relação à utilização do conjunto de pontos, podendo ser locais ou regionais, ou em relação à avaliação de erros associados aos valores interpolados, podendo ser determinísticos ou geoestatísticos. ESRI (2003) explica que os métodos determinísticos usam apenas funções matemáticas para interpolação, enquanto que os métodos geoestatísticos, além de funções matemáticas, utilizam estatísticas, podendo ser usados para avaliar a incerteza das previsões.

De acordo com Pires et al. (2016), os interpoladores determinísticos fazem uso de métodos tradicionais de estimativa por médias ponderadas ou por médias móveis, como ocorre no inverso de distância ponderada (IDP) e no vizinho natural (VN), enquanto que a Krigagem e a Cokrigagem são interpoladores geoestatísticos, em que, segundo os trabalhos realizados por Chaves et al. (2018), Zhifeng et al. (2019), e Ataíde et al. (2020), apresentam vantagens em relação aos interpoladores determinísticos, uma vez que requerem análise variográfica, que dispõe de modelagem adequada na determinação do semivariograma que, conforme Pires et al. (2016), é mais do que uma função da distância entre pontos, e utiliza-se da existência ou não do efeito pepita, da amplitude e da presença de anisotropia, que são elementos geoestatísticos.

De acordo com Klauberg et al. (2018) um aspecto importante das técnicas geoestatísticas é a capacidade de avaliar a incerteza da resposta prevista.

Para Yamamoto e Landim (2013) a interpolação geoestatística calcula estimativas em um âmbito regido por um fenômeno natural com distribuição no espaço e, desse modo, supõe que os valores das variáveis, consideradas como regionalizadas, sejam espacialmente correlacionados. É interessante perceber o aspecto no qual as variáveis regionalizadas podem ser tachadas de incoerentes, visto suas características estruturais e de aleatoriedade (Landim, 2006).

Em relação à krigagem, Machado et al. (2010), afirmam que a mesma se utiliza da dependência espacial contida no semivariograma entre amostras vizinhas, para estimar valores em qualquer posição dentro da área espacial analisada, sem tendência e com variância mínima, sendo ótimos estimadores para a precipitação, que de

acordo com Freire e Baldo (2017), possui variabilidade considerável no tempo e no espaço.

Existem vários tipos de krigagem, como a krigagem universal, a krigagem simples e a krigagem ordinária. De acordo Freire e Baldo (2017), a cokrigagem é uma regressão linear que utiliza duas ou mais variáveis em um determinado local com mesmo domínio espacial, que apresentam certo grau de correlação. Destaca-se que a cokrigagem, é classificada por alguns autores como um método a parte de interpolação, mas também pode ser classificada como um tipo de krigagem, como encontrado em Cunha Neto et al. (2019).

A krigagem universal é uma técnica de interpolação que incorpora correlação espacial entre as observações e as covariáveis medidas no mesmo modelo de previsão (Stein e Corsten, 1991). Em teoria, a krigagem simples é aplicável a fenômenos que não apresentam uma tendência devido à suposição de estacionariedade, ou seja, quando suas características estatísticas são constantes ao longo do tempo, diferentemente da krigagem ordinária na qual as ponderações são interpretadas como probabilidades condicionadas ao número de dados vizinhos (Mukesh et al., 2019).

A krigagem ordinária é um dos métodos de interpolação estocástica mais utilizados para a estimativa da precipitação espacial a partir dos dados pontuais (Boudibi et al., 2019; Qiao et al., 2018; Righi e Basso, 2016; Alves et al., 2016; Pires et al., 2016). Kumar Adhikary et al. (2016) explicam que a eficiência da sua modelagem depende muito do modelo de variograma, sendo que a maior dificuldade associada ao método é a dificuldade de calibrar os modelos, que tendem a ser o esférico, o exponencial ou o gaussiano, como é possível observar em Alves et al. (2016), Pires et al. (2016) e Silva et al. (2018).

Giustini et al. (2016), com o objetivo de mapearem os isótopos estáveis de oxigênio da precipitação na Itália, analisaram algumas técnicas de interpolação e alguns modelos de variograma e decidiram aplicar a krigagem ordinária com o modelo de semivariograma estável em seus dados, tendo em vista que esta modelagem apresentou o menor erro estimado.

Kostopoulou et al. (2020) ao analisar a aplicabilidade da krigagem ordinária no preenchimento de dados de satélite utilizados em análises referentes à gestão costeira na ilha de Creta, verificou-se que para os parâmetros estatísticos utilizados a krigagem ordinária mostrou-se satisfatória, com alta precisão e exatidão, em todos os conjuntos de dados utilizados.

O modelo estável é encontrado em alguns SIG's, como no ArcGis e o Vesper, e se constitui numa combinação dos modelos exponencial e gaussiano. Este modelo apresenta um parâmetro de ajuste do semivariograma, que varia de 0 a 2, sendo que o valor nulo, torna o modelo estável idêntico ao modelo exponencial, e se o parâmetro ajustado resultar em 2, o modelo passa a ser o gaussiano (Ferreira, et al., 2013). Apesar de ser pouco utilizado, em pesquisas hidroclimáticas, o modelo foi aplicado em pesquisas espaciais sobre a qualidade da água subterrânea urbana (Nas e Berkay, 2010), em análises batimétricas (Ferreira et al., 2013) e em representações espaciais de precipitação (Righi e Basso, 2016).

Diante do exposto e, tendo como hipótese de que o método de análise de dados espaciais por krigagem, pode ser capaz de apresentar resultados promissores na complementação de dados climáticos faltantes de natureza espaço-sazonal, esta pesquisa objetivou avaliar a krigagem ordinária, utilizando o modelo geoestatístico estável, no preenchimento de falhas em séries mensais de precipitação pluviométrica, bem como analisar sua espacialização nos períodos sazonais e anual nas Sub-bacias Hidrográficas do Baixo Rio Ivaí e do Alto Rio Tibagi, localizadas em regiões de classificação climática distintas no Estado do Paraná.

Material e métodos

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Estatística Computacional e Aplicada - LECA da Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG, Estado do Paraná.

De acordo com SEMARH (2010), o Estado do Paraná tem uma área de 196.490,1 km² e está situado na região sul do Brasil, fazendo divisa ao norte com o Estado de São Paulo e ao sul com o Estado de Santa Catarina, possuindo 16 bacias hidrográficas, entre elas a bacia do rio Ivaí e do rio Tibagi.

O Estado do Paraná apresenta os tipos climáticos dominantes Cfa e Cfb, na porção noroeste e na porção sudeste, próximo ao centro, respectivamente (Rauen et al., 1977; Nitsche et al., 2019), sendo que as Sub-bacias do Baixo Rio Ivaí (SBRI) com área de 13.431,5 km², e Alto Rio Tibagi (SART), com área de 16.100,4 km², estão inseridas respectivamente em regiões onde se configura os dois tipos climáticos dominantes no Paraná, como mostra a Figura 1a.

Sobre os componentes que integram os aspectos físicos das bacias, entende-se que rio Ivaí nasce no Segundo Planalto e corta todo o Terceiro Planalto em sentido noroeste. De acordo com Maack (1981), na porção noroeste da bacia do rio

Ivaí, encontra-se o arenito da Formação Caiuá do grupo Bauru do período Cretáceo. Essa formação é constituída por apresentar arenitos de coloração vermelho-arroxeados, conhecida como “terra vermelha”.

Ainda de acordo com Maack (1981), a bacia do rio Tibagi é encontrada nos três planaltos, também denominados como Planalto de Curitiba (primeiro planalto), Planalto de Ponta Grossa (segundo planalto) e o Planalto de Guarapuava (terceiro planalto). A área onde a SART está localizada encontra-se o primeiro planalto representado por rochas do embasamento cristalino, que correspondem aos grupos Castro e Açungui e o segundo planalto, representado geologicamente pela sequência de sedimentos da Bacia Sedimentar do Paraná, ou seja, desde o Grupo Rio Ivaí até a Formação Botucatu.

Por serem de grandes extensões, as bacias hidrográficas possuem uma variedade muito grande de solos, como argissolos, cambissolos, latossolos e neossolos, que é de predominância do tipo flúvico na SBRI, e litólico na SART (Embrapa, 1999).

Segundo o Manual Técnico da Vegetação Brasileira do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (IBGE, 1992), a cobertura vegetal primitiva na bacia hidrográfica do rio Ivaí é formada pela Floresta Ombrófila Mista, savana, estepe e Floresta Estacional Semidecidual, mais presente na SBRI, enquanto que a bacia do rio Tibagi, além de apresentar cobertura vegetal também formada pela Floresta Ombrófila Mista e estepe, apresenta ainda Floresta Ombrófila Densa e os chamados “capões”, onde é encontrada a Araucária (*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntz), que é a árvore característica do Estado Paraná.

Figura 1. Localização no Estado do Paraná dos climas encontrados nas sub-bacias hidrográficas do baixo rio Ivaí e alto rio Tibagi e com os respectivos postos pluviométricos utilizados.

A maioria dos postos pluviométricos mensais são provenientes do Instituto Águas Paraná, porém, na SBRI o posto Cianorte é disponibilizado pelo Instituto Agrônomo do

Paraná - IAPAR, assim como os postos Ponta Grossa e Telêmaco Borba na SART, além destes, Castro e Irati foram obtidos por meio do Instituto

Nacional de Meteorologia - INMET, como se pode observar na Figura 1b e Figura 1c.

Com o intuito de melhorar a espacialização, adicionalmente, foram incluídos alguns postos circundantes das bacias avaliadas, cujo período de dados está compreendido entre

1974 e 2018, totalizando 45 anos de registro histórico. Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas respectivamente informações sobre os postos pluviométricos da SBRI e da SART.

Tabela 1. Postos pluviométricos utilizados na SBRI.

Posto	Coord. Y	Coord. X	Alt.(m)	Média Anual	Desvio Padrão
Águas do Jacu	7411943	271968	270	1347,900	79,536
Alto alegre	7388001	264314	500	1515,658	90,714
Amaporã	7445923	317193	396	1496,284	88,564
Aparecida do Ivaí	7434713	288459	300	1414,549	82,561
Araruna	7356053	349029	650	1651,771	90,780
Bairro centenário	7371583	267299	550	1599,195	88,731
Bernadelli	7392529	311187	500	1563,972	93,076
Cianorte	7382944	340757	484	1569,378	97,049
Cianorte-IAPAR	7381781	338559	530	1664,278	93,913
Cianorte-COPEL	7379928	335151	510	1440,150	78,183
Cidade Gaúcha	7412798	301298	422	1521,656	87,441
Comur	7446586	299308	362	1435,812	84,256
Cop. do Norte	7397036	359040	358	1598,376	91,793
Cruz. do Oeste	7368821	287821	480	1511,818	87,007
Dep. José Afonso	7442874	324629	383	1415,921	83,485
Douradina	7414044	266623	450	1484,905	88,039
Doutor Camargo	7395066	375818	500	1582,492	94,013
Eng. Beltrão	7369231	372642	520	1692,846	97,445
Est. criação estado	7446566	353217	480	1522,383	86,315
Estr. Pernambuco	7400663	237849	400	1470,841	82,739
Faz. Erechim	7461839	289700	446	1560,409	94,592
Faz. novo matão	7460884	315444	460	1469,381	87,401
Faz. Sta. Fé	7450424	231840	285	1377,767	82,511
Faz. São Mateus	7464592	257820	292	1254,328	81,253
Floraí	7420028	367142	521	1565,826	92,428
Gauchinha	7438637	300838	354	1491,530	87,937
Guairaçá	7464717	327394	530	1319,391	76,812
Guaporema	7418507	319376	400	1431,508	89,919
Herculândia	7426717	251066	300	1503,988	84,061
Icaraíma	7411650	232538	450	1560,119	90,850
Icatu	7457272	254318	399	1427,179	84,275
Igarité	7367748	332770	572	1576,920	92,165
Indianópolis	7402007	326247	501	1717,377	104,911
Ivaítinga	7431269	361896	497	1528,128	84,727
Japurá	7403965	341691	500	1612,056	95,253
Loanda	7462303	281258	494	1328,209	79,699
Loanda-COPEL	7464118	281231	395	1438,906	87,047
Malu	7381288'	359220	474	1663,544	101,027
Maria Helena	7387463	275099	372	1536,367	89,447
Maringá	7410282	454025	542	1704,944	95,962
Maringá-COPEL	7406321	399588	570	1581,905	92,047

Nordestina	7435034	312377	350	1318,033	74,788
Nova esperança	7435723	378916	582	1511,736	89,880
Nova olímpia	7401154	287179	453	1558,341	93,422
Ourizona	7411231	377782	561	1621,474	96,066
Ouro verde	7381128	298468	447	1496,311	85,147
Paranavaí-COPEL	7444638	348114	440	1454,746	82,359
Peabiru	7355002	364000	527	1654,877	93,963
Plan. do Paraná	7453300	359443	433	1425,109	83,484
Porto bananeira	7381092	385937	520	1647,285	95,911
Porto Camargo	7413212	218868	350	1378,649	79,601
Porto jundiá	7435773	240669	300	1250,325	77,608
Porto P. do Norte	7420113	380691	250	1417,537	85,861
Porto São Carlos	7415406	344238	293	1468,021	90,647
Pulinópolis	7424804	399462	430	1325,673	78,504
Querência do Norte	7444322	194579	349	1357,907	84,937
Rondon	7407453	321215	400	1617,317	96,445
Saltinho	7367278	364196	550	1728,382	101,966
Santa Eliza	7395926	248549	441	1583,587	90,506
St. Isabel do Ivaí	7454066	275652	400	1356,459	82,826
Santa Mônica	7406482	294030	380	1462,240	86,947
São José do Ivaí	7440145	266810	350	1407,902	81,682
Silviolândia	7345835	374092	425	1678,033	95,794
Sítio floresta	7387671	377950	339	1646,102	97,220
Tapejara	7375894	309703	470	1405,944	80,001
Tapira	7419572	288334	401	1472,872	87,679
Taquarimbé	7363448	347225	600	1452,076	87,243
Tuneiras do Oeste	7359259	308252	400	1492,564	90,854
Umuarama-IAPAR	7373460	267269	480	1674,929	91,496
Venda do Paulo	7417545	252897	500	1395,483	80,238
Vila Carbonela	7393828	263056	455	1540,113	89,059

Tabela 2. Postos pluviométricos utilizadas na SART.

Posto	Coord. Y	Coord. X	Alt.(m)	Média Anual	Desvio Padrão
Abapã	7241459	618718	1007	1488,735	80,265
Acamp. Mirandinha	7308788	555796	950	1544,921	81,851
Alto Amparo	7262628	553927	950	1559,662	83,135
Aparição	7262456	587661	1100	1637,067	86,214
Apiava	7197232	521523	872	1658,165	81,859
Bairro biquinha	7299299	598032	1250	1842,520	101,240
Bairro dos pintos	7336408	569458	900	1487,506	97,216
Bairro olarias	7319912	540611	1050	1738,010	113,505
Bairro três vendas	7347646	491551	1011	1795,806	98,030
Br. Rib. das antas	7342202	531268	1000	1475,219	82,775
Bateias	7232387	649673	890	1462,217	79,803
Bocaina	7236728	574011	950	1516,934	81,935
Bom jardim	7268171	552291	750	1593,252	89,498
Bom jardim do Sul	7231374	521885	900	1628,071	82,994
Boqueirão	7238453	589163	1050	1672,109	82,507
BR-376	7201480	597590	830	1518,219	89,756

Campina alta	7286709	535450	900	1670,690	99,205
Campina do guararema	7280920	591125	1100	1612,663	84,292
Capão alto	7256722	614553	920	1463,480	82,391
Capinzal	7289789	629041	1026	1429,623	77,560
Castro	7259042	601092	1008	1538,987	81,258
Castro	7258704	601089	1009	1438,329	78,941
Catanduva de fora	7240217	600953	1000	1551,043	79,414
Caxambu	7269789	599484	1100	1325,647	70,337
Cerro azul	7250323	535498	905	1439,623	79,407
Chácara cachoeira	7262392	597155	975	1614,000	97,126
Colônia Iapó	7271715	587579	1015	1633,158	84,637
Colônia Tapera	7218056	602498	1100	1569,465	81,650
Col. Witmarsun	7186571	618993	950	1546,300	80,282
Curiuva	7342004	555927	750	1486,407	89,524
Eng. Rosaldo	7238791	561208	780	1468,268	79,225
Faxinal Grande	7181172	602218	1000	1594,933	80,123
Faxinalzinho	7332856	503387	900	1584,005	84,387
Faz. Fortaleza	7303192	569296	850	1667,189	115,705
Faz. Manzanilha	7292177	563584	730	1537,201	83,010
Fazenda R. R.	7246124	505049	758	1776,789	102,376
Faz. Santana sol	7326882	515377	715	1606,882	95,717
Faz. São Carlos	7269965	570818	1200	1574,307	85,821
Fernandes Pinheiro	7185157	541919	893	1625,911	83,116
Gleba 5	7351297	518654	850	1615,241	92,778
Gonçalves Júnior	7183359	521808	797	1693,529	89,211
Guaiaca	7165940	580290	856	1555,732	80,114
Guamiranga	7212891	520149	850	1587,609	80,878
Guaragi	7203488	577215	1000	1544,561	87,386
Guarauna	7196145	563728	900	1561,205	90,359
Guaricanga	7291806	616532	962	1502,040	79,889
Imbituva	7208663	540230	869	1633,622	83,394
Ipiranga	7231322	543716	890	1455,031	82,484
Irati	7184063	537196	836,95	1535,118	86,145
Irati	7183326	536887	837	1608,043	84,654
Irati	7183335	533508	812	1485,153	80,406
Irati-COPEL	7183331	535183	1011	1709,883	93,588
Itaiacoca	7219866	610885	1012	1563,562	82,958
Itapara	7183377	501703	900	1811,945	95,469
Ivaí	7233198	515134	808	1686,371	87,445
Ivaí	7233200	513480	850	1812,381	92,923
Jusante do Rio faca	7300379	496789	490	1482,153	83,984
Lageado bonito	7327301	523701	850	1537,951	92,003
Lageado liso	7343833	531017	640	1482,422	88,871
Lagoa Monte alegre	7323556	545699	885	1710,297	106,330
Leal-Faz. Monte alegre	7321776	515231	825	1645,910	97,252
Mal	7314385	537240	650	1552,075	85,230
Mandaçais	7215970	593075	951	1561,295	80,541
Mato queimado	7216087	617601	800	1435,847	77,216
Mirim	7319968	491567	650	1831,866	107,391

Ortigueira	7322582	507672	789	1617,253	92,645
Ourofino de baixo	7202011	647492	781	1479,159	81,890
Palmito	7257041	565698	800	1574,925	90,547
Papagaios novos	7190476	587199	950	1672,522	90,978
Prq. Est. Vila velha	7210698	599056	880	1613,698	84,803
Patos velhos	7192635	503353	750	1689,359	93,012
Pedras	7162616	610413	1100	1689,102	93,765
Pinhalzinho	7332850	486478	750	1752,689	101,469
Pinheirinho	7232857	637118	517	1518,477	85,198
Piraí do Sul	7286764	608497	1068	1549,771	83,120
Piriquitos	7218222	577299	1000	1540,617	86,154
Poço cachoeira	7277438	540488	1000	1328,785	89,309
Pombal	7238688	538692	950	1574,597	87,557
Ponta Grossa	7219527	585427	885	1482,944	72,090
Ponta Grossa- COPEL	7231112	587461	1011	1786,000	98,727
Rebouças	7165253	531315	918	1549,674	83,179
Região KM 9	7201739	550332	950	1535,705	85,231
Rio dos patos	7212904	506744	690	1688,378	90,433
Sabará	7210757	590661	833	1509,682	79,990
Saltinho	7218442	501707	750	1695,156	87,052
Santa cruz	7212635	585635	790	1683,485	88,198
Sta. Maria	7240454	560571	1000	1529,214	80,070
Salto das antas	7337944	537076	604	1436,512	82,881
S. João do triunfo	7159229	570242	800	1431,226	74,461
São Silvestre	7228819	637890	800	1566,600	90,715
Sapopema	7356347	543683	764	1576,453	90,597
Socavão	7259402	631428	1051	1990,127	114,101
Sumidouro-Us. São Jorge	7231078	592506	850	1347,709	83,267
Tabor	7275043	633292	1100	1498,792	80,002
Taqueral	7188193	639125	800	1289,800	68,552
Teixeira Soares	7194343	553658	950	1608,951	83,936
Telêmaco Borba	7308105	539421	754	1572,167	79,891
Telêmaco Borba- IAPAR	7308845	538888	768	1649,932	86,557
Tibagi	7289088	559658	720	1656,898	86,520
Três córregos	7208545	637685	800	1469,606	83,153
Turvo	7157449	548493	790	1578,015	81,941
Us. Manoel Ribas	7199611	600652	870	1387,067	73,266
Usina Mauá	7340205	530501	550	1471,024	83,303
Uvaia	7226546	561630	975	1574,023	77,288
Ventania	7321571	577877	1050	1582,128	87,852
Vieiras	7182268	570559	892	1830,261	102,803

Como observado na Tabela 1, Saltinho apresentou a maior média anual, com desvio padrão relativo de 5,899%, sendo que o posto Porto Jundiá teve a menor média, com desvio padrão relativo de 6,207%. Na Tabela 2, o posto de maior e de menor média anual foi o Socavão e o Taqueral,

respectivamente, com desvio padrão relativo de 5,733% e de 5,314%. Nota-se que diferentemente das médias, os desvios relativos não são valores extremos dos conjuntos de dados.

A partir dos dados observados foi realizada uma consistência, para contabilização da

porcentagem de falhas e para análises posteriores, os dados mensais foram organizados em cinco grupos, sendo que, quatro deles levando em consideração as estações do ano: verão (jan, fev e mar), outono (abr, mai e jun), inverno (jul, ago e set), primavera (out, nov e dez); e anual.

Para o preenchimento de falhas das séries, foi utilizado o *software* ArcGis 10.7.1, a partir de interpolação geoestatística, usando a krigagem ordinária com a aplicação do modelo estável, realizada por meio da ferramenta *Geostatistical Analyst* que gerou superfícies visualizadas pela extensão integrante do ArcGis.

O modelo estável (equação 1), utilizado nesta pesquisa, consiste numa combinação linear entre os modelos exponencial e gaussiano, cuja definição é apresentada em ESRI (2003).

$$\gamma(h) = \theta_s \left[1 - \exp \left(-3 \left(\frac{|h|}{\theta_r} \right)^{\theta_e} \right) \right] \quad (1)$$

em que:

h: módulo da distância entre um par de pontos;

θ_s : parâmetro de contribuição;

θ_r : parâmetro de alcance;

θ_e : parâmetro de ajuste da modelagem ($0 \leq \theta_e \leq 2$).

A anisotropia foi utilizada quando se verificou direções privilegiadas no comportamento da precipitação em certos anos, como por exemplo, aqueles com ocorrência dos fenômenos ENOS. Sua constatação é percebida nos semivariogramas quando o alcance, o patamar, ou ambos, variam conforme a direção angular (Pereira et al., 2018). Conforme Berveglieri et al. (2011) as pesquisas que utilizam de interpolação geoestatística devem ser tratadas de forma independente, pois a modelagem está de acordo com as percepções de quem a manipula.

Para avaliação da eficiência da modelagem geoestatística aplicada, além da análise espacial realizada pela comparação de mapas, com o auxílio de planilhas eletrônicas e do *software* R, análises estatísticas foram realizadas a partir das médias

mensais calculadas para os períodos sazonais e anual.

Tendo em vista a exigência de normalidade para uso do teste “t” de Student na comparação de médias, preliminarmente, foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk. Uma vez que houve a rejeição da hipótese de normalidade para os períodos das sub-bacias, o teste não-paramétrico de Wilcoxon foi utilizado na comparação das diferenças sendo o nível de significância adotado de 5%.

Para verificação da acuracidade do modelo estável aplicado à dados de precipitação, foi realizada uma análise do viés das médias estimadas em relação às médias observadas. Para tanto, assim como em Cardoso e Quadros (2017), se utilizou o coeficiente de correlação (r), o Erro Médio Absoluto (EMA), a Raiz do Erro Médio Quadrático (REQM), o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) (Nash e Sutcliffe, 1970) e o coeficiente de concordância “d” de Willmott (Willmott et al., 1985), conforme as equações 2, 3, 4 e 5.

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_{obs} - \theta_{est}|}{n} \quad (2)$$

$$REQM = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{obs} - \theta_{est})^2}{n} \right)} \quad (3)$$

$$NS = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{obs} - \theta_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (\theta_{obs} - \bar{\theta})^2} \right) \quad (4)$$

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{obs} - \theta_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (|\theta_{oest} - \bar{\theta}| + |\theta_{obs} - \bar{\theta}|)^2} \right) \quad (5)$$

em que:

θ_{obs} : valor observado;

θ_{est} : valor estimado;

$\bar{\theta}$: média dos valores observados;

n: número total de pares de valores observados e estimados.

Resultados e discussão

Na Tabela 3 é apresentado o percentual médio de falhas de dados presentes no período histórico da base de dados nas duas sub-bacias utilizadas nessa pesquisa.

Tabela 3: Percentuais médios de falhas de dados observados sazonalmente (por estações do ano) e anualmente nas SBRI e SART.

Sub-bacia	verão (%)	outono (%)	inverno (%)	primavera (%)	anual (%)
SBRI	23,453	23,119	23,682	23,515	23,442
SART	33,529	33,535	33,724	33,053	33,460

É possível observar que, de maneira geral, as percentagens médias sazonais e anual de falhas

na SBRI e na SART se situaram próximas de 23% e 33%, respectivamente.

Na Figura 2 é possível verificar que os mapas onde as estações pluviométricas apresentaram falhas nos dados e os mapas em que as falhas de dados dos postos pluviométricos foram

totalmente preenchidas, de modo geral, apresentam as classes de frequências e as áreas muito similares ao serem representadas tanto em relação à localização quanto à dimensão.

Nota: Mapas com as letras de “a” a “d” representam respectivamente o verão, o outono, o inverno e primavera, sendo que os mapas com letras minúsculas em destaque são os gerados com falhas nos dados e, os mapas com letras maiúsculas são os gerados com as falhas preenchidas com os dados estimados a partir da krigagem ordinária usando o modelo estável.

Figura 2. Representação espacial da pluviometria sazonal na SBRI.

Numa perspectiva sazonal, observa-se que na primavera (Figuras 2d e 2D) e no verão (Figuras 2a e 2A) são encontrados os maiores índices pluviométricos, caracterizando o período mais chuvoso para a SBRI. Por outro lado, no outono (Figuras 2b e 2B) e no inverno (Figuras 2c e 2C), os índices pluviométricos são menores indicando um período mais seco. Anteriormente, Terassi et al. (2017b) utilizaram a média ponderada para o preenchimento de falhas no período histórico de 1976 a 2012 nas bacias hidrográficas dos rios Pirapó e Paranapanema IV, que são vizinhas à

SBRI, também concluíram que as estações sazonais de maiores índices pluviométricos foram verão e primavera, sendo outono e inverno as de menores totais precipitados. Baldo (2006), ao trabalhar na área com dados pluviométricos entre os anos de 1976 a 2001, também apontou a primavera como sendo a estação mais chuvosa, sendo que o inverno se apresentou como a menos chuvosa.

Em relação ao verão, a área ao noroeste na Figura 2a, delimitada pelas coordenadas Y 7464143 e 7400286 e pelas coordenadas X 282913

e 219115, incluem os postos Porto Camargo (7413212 - 218868), Faz. Stª Fé (7450424 - 231840), Porto Jundiá (7435773 - 240669) e Loanda (7462303 - 281258), posto este que possui um dos maiores percentuais de falhas aproximando-se de 71,1%. Com exceção do posto Loanda, que estava representada na 6ª classe (400-438 mm) e passou para a 7ª classe (438-476 mm), as demais se deslocaram da 5ª (362-400 mm) para a 6ª classe (400-438 mm), o que implica que na interpolação houve uma atualização de seus valores em torno de 38 mm (amplitude das classes), conforme pode se notar comparando as Figuras 2a e 2A. Próximo à região central da SBRI, os postos Rondon (7407453 - 321215), Guaporema (7418507 - 319376) e Guairaçá (7464717 - 327394), apresentaram aumento dos índices pluviométricos, de maneira que transitaram da 7ª classe (438-476 mm) para a 8ª classe (476-514 mm), alteração esta decorrente do preenchimento de suas falhas. A área delimitada pelas coordenadas Y 7420193 e 7358165 e pelas coordenadas X 309126 e 238614, que inclui o sul e sudoeste da SBRI, apresenta postos pluviométricos que em sua grande maioria que obtiveram acréscimo em seus valores, como por exemplo as estações Águas do Jacu (7411943 - 271968), Tapejara (7375894 - 309703) e Estr. Pernambuco (7400663 - 237849) que mudaram de classe, deixando de ser representadas na 6ª classe e passando a ser representadas na 7ª classe. Por sua vez, a posto Cianorte-IAPAR (7381781 - 338559), ao ser preenchida, teve seus valores decrescidos, como é

possível verificar comparando as Figuras 2a e 2A. De uma forma generalizada observa-se nas Figuras 2a e 2A, um comportamento de diminuição gradativa dos valores pluviométricos no sentido montante a jusante, concordando com o que foi encontrado por Baldo (2006). Conforme observado no trabalho desse autor, que analisou a região por meio de dados históricos no período de 1976 a 2001, os valores de precipitação encontrados são similares aos expostos na Figura 2a, entretanto, Nitsche et al. (2019) ao trabalharem com período histórico entre 1974 a 2015 para o Estado do Paraná, apresentaram resultados mais próximos aos exibidos na Figura 2A, mostrando que o preenchimento espacial realizado por meio do modelo estável foi bastante satisfatório.

Complementando com uma análise estatística (Tabela 4), verifica-se que apesar dos valores de precipitação observados e krigados serem considerados diferentes significativamente ao nível de 5% pelo teste de Wilcoxon, numa análise de viés para determinar a concordância e acuracidade dos resultados, verificou-se um bom desempenho do modelo estável, uma vez que os valores de r , NS e d foram superiores a 0,8 com o EMA e REQM apresentando valores próximos de 18 e 32 mm, respectivamente, o que representa flutuações relativamente pequenas na comparação dos dados observados e krigados, tendo em vista uma magnitude geral próxima de 450 mm na extensão da SBRI no verão.

Tabela 4: Análise estatística confrontando as pluviometrias sazonais e anuais na SBRI

	verão	outono	inverno	primavera	Anual
p-Wilcox	3,89E-04	6,02E-06	0,454	1,53E-06	0,058
r	0,843	0,917	0,912	0,779	0,921
NS	0,819	0,797	0,806	0,550	0,811
d	0,907	0,936	0,936	0,839	0,940
EMA	17,971	8,468	9,495	14,640	28,025
REQM	32,119	13,087	10,997	24,129	49,671

Nota: Os dados foram avaliados de acordo com o teste de Wilcoxon (p-Wilcox), coeficiente de correlação (r), índice eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), índice de Willmott (d), Erro Médio Absoluto (EMA) e Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) em séries de dados com falhas e, as séries com as falhas preenchidas com os dados estimados a partir da krigagem ordinária usando o modelo estável.

No que se refere à estação outono, conforme se verifica nas Figuras 2b e 2B, na região de transição entre as classes de maiores áreas, que são a 3ª classe (286-324 mm) e a 4ª classe (324-362 mm), estão localizados os postos Stª Mônica (7406482 - 294030), Venda do Paulo (7417545 - 252897), Florai (7420028 - 367142), Rondon (7407453 - 321215), e Herculanã (7426717 - 251066), localidade esta que possui o maior

percentual de falhas da SBRI. Estes postos, que depois do preenchimento apresentaram seus valores diminuídos, foram responsáveis por ampliar a área de representação da 3ª classe. O surgimento da pequena porção de área que está representada na 5ª classe (362-400 mm), conforme Figura 2B foi decorrente da modelagem utilizada para espacialização, que promoveu uma transição desta classe que estava na periferia da SBRI, de

acordo com a Figura 2b. Os resultados encontrados nessa estação sazonal são concordantes com os trabalhos realizados por Baldo (2006) e Nitsche et al. (2019).

Ao avaliar as informações presentes na Tabela 4, verifica-se que apesar da análise estatística indicar que os valores observados e estimados possuem diferenças estatísticas significativas pelo teste de Wilcoxon em seus valores médios, a análise da concordância e acuracidade do modelo apresenta um bom índice NS, além de apresentar um dos melhores resultados para os índices r e d , superiores a 0,91. É importante destacar que para este período o EMA foi o menor valor encontrado (8,5 mm) dentre as demais estações do ano, confirmando o bom desempenho do modelo estável, no preenchimento das séries pluviométricas no outono.

Concernente ao inverno, ao oeste, está o posto Porto São Carlos (7415406 - 344238) que deixa de ser representado pela 1ª classe (210-248 mm), conforme mostra a Figura 2c, para ser representado na 2ª classe (248-286 mm) como está exibido na Figura 2C. Em contrapartida, os postos Cidade Gaúcha (7412798 - 301298) e Ivaitinga (7431269 - 361896) mudaram da 2ª classe para a 1ª classe, revelando que a interpolação diminuiu seus valores em torno de 38 mm. Os outros postos próximos aos postos citados tiveram a mesma tendência de acréscimo ou decréscimo dos seus valores, mas que não foram suficientes para alterar suas classes de representação, mesmo influenciando o seu entorno, o que justifica a mudança de disposição da faixa transitória entre as classes de maiores áreas. Na pesquisa realizada por Baldo (2006) e por Nitsche et al. (2019) é possível verificar a similaridade dos resultados encontrados pelos autores com os apresentados nas Figuras 2c e 2C. Pela Tabela 4, é possível ratificar por meio das análises estatísticas que o inverno foi um dos melhores períodos representados utilizando do modelo estável, visto que os valores médios observados e preenchidos não diferiram significativamente pelo teste de Wilcoxon e, que os índices r , d e NS foram superiores a 0,8 sendo considerados muito bons. Os valores do EMA e do REQM foram relativamente pequenos, com valores próximos a 9,5 e 11 mm, respectivamente.

Para a primavera, ao norte da SBRI, o posto Faz. Erechim (7461839 - 289700), apresentou alteração em sua representação, que estava na 7ª classe, conforme Figura 2d e ascendeu para a 8ª classe (Figura 2D), em decorrência da proximidade com a localidade de Loanda-COPEL (7464118 - 281231), que apresentou 73,3% de falhas. Na região de transição entre a 7ª classe e 8ª classe estão as estações Águas do Jacú (7401154 -

287179), Nova olímpia (7401154 - 287179), Bernadelli (7392529 - 311187), Indianópolis (7402007 - 326247), Japurá (7403965 - 341691), e Ivaitinga (7431269 - 361896), que também exibiram acréscimo em seus valores mudando da 7ª para a 8ª classe. Por outro lado, os postos Ourizona (7411231 - 377782), Maringá (7410282 - 454025) e Maringá-COPEL (7406321 - 399588), sofreram acréscimos em seus valores, mudando da 7ª classe para a 8ª classe. Na região sudeste e sudoeste, onde estão localizados os postos Saltinho (7367278 - 364196) e Bairro centenário (7371583 - 267299) que tiveram aumento em seus valores deixando de ser representadas na 8ª classe (Figura 2d) e passando a ser representadas na 9ª classe (514-552mm) na Figura 2D. Nos trabalhos realizados por Baldo (2006) e Nitsche et al. (2019) não foram encontrados valores superiores a 500 mm, havendo similaridade, portanto, com os valores encontrados na Figura 2d.

Integrando a análise espacial do período com uma análise estatística, conforme a Tabela 4 observa-se que os valores médios de precipitação observados e krigados na primavera foram considerados significativamente diferentes, pelo teste de Wilcoxon. Numa avaliação do viés, verificou-se os menores valores dos índices r , d e NS dentre todos os períodos sazonais, sendo que o valor de NS foi de 0,550 indicando um desempenho satisfatório do modelo estável. Os valores de EMA e REQM apresentaram respectivamente magnitudes de 15 e 24 mm, o que representa flutuações relativamente pequenas na comparação entre dados observados e krigados, tendo em vista uma grandeza em termos gerais próxima de 470 mm na extensão da SBRI no verão.

A Figura 3 mostra os valores referentes aos totais médios anuais, na qual os mapas são similares na apresentação das frequências e na localização das áreas apresentadas. Ao oeste da SBRI, estão localizados os postos Porto São Carlos (7415406 - 344238), Estr. Pernambuco (7400663 - 237849) e Alto Alegre (7388001 - 264314) que obtiveram acréscimos em seus valores, sendo que os dois primeiros transitaram da 4ª classe (1448-1494 mm) para a 5ª classe (1494-1540 mm), enquanto que o último, mudou da 5ª para a 6ª classe (1540-1586 mm). Ao noroeste, encontra-se o posto São José do Ivaí (7440145 - 266810) que deixou de ser representado na 2ª classe (1356-1402 mm) para ser representado na 3ª classe (1402-1448 mm) em decorrência do aumento de seus valores. No que diz respeito ao norte da bacia, a área delimitada entre as coordenadas Y 7464596 e 7438300, e coordenadas X 317108 e 283286, foi influenciada pelo posto Loanda, que possui 70,7% de falhas e obteve um grande acréscimo em seus valores

krigados, impactando principalmente seu posto vizinho, o posto Faz. Erechim (7461839 - 289700) que apresentou alteração em sua representação

deixando de estar na 3ª classe para ser representada na 5ª classe, de acordo com as Figuras 3a e 3A, respectivamente.

Figura 3. Representação espacial na pluviometria anual na SBRI.

Ao comparar os resultados apresentados com os encontrados por Baldo (2006), observa-se que apesar dos valores máximo e mínimo estarem mais similares com a Figura 3a, a disposição espacial das classes é mais próximo ao que é apresentado na Figura 3A. Nitsche et al. (2019) expõem as alturas pluviométricas anuais variando entre 1200-1800mm, como é visualizado nas Figuras 3a e 3A.

Andrade e Nery (2011) quando avaliaram toda bacia do rio Ivaí, no período de 1975 a 2005 por meio de um dendrograma, classificaram as estações pluviométricas analisadas em 5 grupos, onde cada um dos grupos apresentou características semelhantes na intensidade e na frequência de ocorrência da precipitação, sendo que a SBRI foi representada à noroeste, pelo grupo I, seguido por grande parte do grupo II e uma parcela do grupo IV e V, com médias anuais de variando entre 1300 a 1700 mm, que estão de acordo os resultados apresentados (Figuras 3a e 3A).

Aparecido et al. (2016), utilizando dados climatológicos do período de 1989 a 2014 e o método de krigagem com o modelo esférico, representaram a SBRI, em sua maior parte, com o total anual de precipitação entre 1200-1400 mm e

no extremo sudeste, com a precipitação variando entre 1400-1550 mm, sendo que para mesma região os valores encontrados foram superiores conforme pode ser observado nas Figuras 3a e 3A.

No trabalho realizado por Andrade e Nery (2003) na SBRI, no período de 1974 a 2001, os mesmos afirmaram que à jusante da bacia se encontra os menores valores de precipitação, concordando com as Figuras 3a e 3A. O mesmo ocorreu na pesquisa realizada por Siqueira, Nery e Martins (2018), que representaram por meio de isoietas do total anual entre 1970 a 2014 na Bacia do Paraná, valores próximos a 1360mm ao noroeste da SBRI, havendo pouco variação da precipitação no território da sub-bacia, indicando precipitação máxima próxima à 1460mm, sendo que uma das justificativas para a diferença entre o trabalho citado e o presente é a utilização de dados em ponto, que é capaz de uniformizar pequenas áreas, dificultando a visualização de pequenas alterações.

Ao analisar a Tabela 4, nota-se pelo teste de Wilcoxon, que as médias dos valores observados e krigados não apresentaram diferenças estatisticamente significantes. Na perspectiva do viés ou erro sistemático, o índice de eficiência NS (Nash-Sutcliffe) foi considerado adequado e que no

período se verificou os maiores valores dos índices de correlação (r) e de concordância (d), ambos superiores a 0,92. O EMA e o REQM, próximos a 28 e 50mm, respectivamente, foram considerados pequenos em relação ao montante médio encontrado na região. Além disso, observa-se que a análise estatística indica o período anual como sendo um dos melhores períodos da SBRI estimados pela krigagem ordinária utilizando do modelo estável.

De maneira geral na Figura 4, referente à sub-bacia do Alto Rio Tibagi (SART), é possível verificar que os mapas onde os postos pluviométricos apresentaram falhas nos dados (Figuras de 4a a 4d) e os mapas em que as estações pluviométricas foram totalmente preenchidas (Figuras de 4A a 4D), mostraram as classes equivalentes ao serem representadas e, com as áreas muito semelhantes tanto em relação à localização quanto à dimensão.

De acordo com o panorama sazonal, observa-se que no verão (Figuras 4a e 4A) e na primavera (Figuras 4d e 4D) foram encontrados os maiores índices pluviométricos, caracterizando o período mais chuvoso para a SART. Por outro lado, no inverno (Figuras 4c e 4C) e no outono (Figuras 4b e 4B) os índices pluviométricos foram menores indicando um período menos chuvoso.

Em relação ao verão, a área delimitada pelas coordenadas Y 7221610 e 7170350, e coordenadas X 619302 e 553562, apresentam os postos Mato queimado (7216087 - 617601), Itaiacoca (7219866 - 610885), Guaragi (7203488 577215), Mandaçaia (7215970 - 593075) e Sabará (7210757 - 590661), posto este que apresentou 82,2% de falhas. Estes postos deixaram de ser representados pela 7ª classe na Figura 4a, e passaram para a 8ª classe, na Figura 4A, como consequência do preenchimento de falhas. Na Figura 4A, as áreas representadas pela 9ª e 10ª classe, possuem valores próximos aos da Figura 4a,

mas que não foram representadas na mesma, ou seja, a presença dessas classes na Figura 4A não foi em decorrência do preenchimento de falhas, mas provavelmente um efeito do processo de espacialização, devido à variabilidade dos dados. Terassi e Galvani (2017) utilizaram alguns postos pluviométricos encontrados na SART, com séries históricas de 1976 a 2015 que possuíam até 5% de falhas e foram preenchidas pelo método de ponderação regional, para analisar a distribuição espacial da precipitação mensal em três bacias hidrográficas ao leste do Estado do Paraná, entre elas estavam a Sub-bacia do Alto Rio Iguaçu (SARI) e a Bacia do Rio Ribeira (BRR) que fazem divisa com a SART, e encontraram para a área delimitada pelas coordenadas Y 7197296 e 7161061, e coordenadas X 650964 e 566906, inserida na SARI, resultados semelhantes aos da Figura 4A, enquanto que a área delimitada pelas coordenadas Y 7289589 e 7197766, e pelas coordenadas X 651982 e 600639, que está inclusa BRR, apresentou concordância com a Figura 4a. No levantamento realizado por Nitsche et al. (2019) percebeu-se uma similaridade do que foi exposto pelos autores com os resultados apresentados nas Figuras 4a e 4A, visto que os mesmos estabeleceram que a região apresentou alturas pluviométricas entre 401-600 mm.

Nos resultados da Tabela 5 verificou-se, pelo teste de Wilcoxon, que os dados observados e krigados são estatisticamente semelhantes entre si. Os valores de EMA e REQM, próximos de 18,8 e 34,2 mm, respectivamente, apesar de serem os maiores valores no período sazonal, apresentaram flutuações relativamente pequenas em relação ao total da SART, que foi próximo de 470 mm. Apesar dos índices r , d e NS, terem exibido os menores valores dos períodos, o modelo estável estimou satisfatoriamente a precipitação para o verão na região avaliada.

Nota: Mapas com as letras de “a” a “d” representam respectivamente o verão, o outono, o inverno e primavera, sendo que os mapas com letras minúsculas em destaque são os gerados com falhas nos dados e, os mapas com letras maiúsculas são os gerados com as falhas preenchidas com os dados estimados a partir da krigagem ordinária usando o modelo estável.

Figura 4. Representação espacial na pluviometria sazonal na SART.

Tabela 5: Análise confrontando as pluviometrias sazonais e anuais na SART.

	verão	Outono	inverno	Primavera	Anual
p-Wilcox	0,369	2,76E-06	0,057	0,002	0,489
<i>r</i>	0,752	0,821	0,812	0,802	0,892
NS	0,551	0,631	0,648	0,599	0,764
<i>d</i>	0,817	0,863	0,882	0,843	0,916
EMA	18,808	14,334	10,915	16,168	37,171
REQM	34,239	22,790	18,966	28,015	57,614

Nota: Os dados foram avaliados de acordo com o teste de Wilcoxon (p-Wilcox), coeficiente de correlação (*r*), índice eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), índice de Willmott (*d*), Erro Médio Absoluto (EMA) e Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) em séries de dados com falhas e, as séries com as falhas preenchidas com os dados estimados a partir da krigagem ordinária usando o modelo estável.

Para o outono, ao norte, está o posto Lagoa Monte alegre (7323556 - 545699), que apresentou 86,7% de falhas e que transitou da 3ª para a 4ª classe, de acordo com as Figuras 4b e 4B. Do leste ao sudeste, os postos Pedras (7162616 - 610413),

Capão alto (7256722 - 614553), Boqueirão (7238453 - 589163), Faxinal grande (7181172 - 602218) e BR-376 (7201480 - 597590), sendo que este último apresentou 84,4% de falhas, mudaram da 4ª para a 3ª classe, pois obtiveram decréscimo

ao serem submetidas ao processo de preenchimento de falhas dos dados. Ao sudoeste, a região entre as coordenadas Y 7209200 e 7179591, e coordenadas X 550249 e 520143, estão os postos Imbituva (7208663 - 540230), Região KM 9 (7201739 - 550332), Apiava (7197232 - 521523), Gonçalves Júnior (7183359 - 521808) e Irati-COPEL (7183331 - 535183) que também tiveram decréscimos em seus valores, deixando de ser representadas pela 5ª classe, para ser representadas pela 4ª classe. Terassi e Galvani (2017) expõem o valor total médio de precipitação da área considerada na BRR que possui equivalência na mesma região representada nas Figuras 4b e 4B, enquanto que na área considerada na SARI, há semelhança com a Figura 4B. Nitsche et al. (2019) exibiu a SART variando entre 301-400 mm, faixa esta que se aproximou dos resultados expostos nas Figuras 4d e 4D, apesar dos valores mínimos verificados nos respectivos mapas partirem de 286 mm.

A partir das estatísticas (Tabela 5), verificou-se que os totais médios observados e preenchidos diferiram estatisticamente pelo teste de Wilcoxon. Na avaliação da acuracidade e concordância, foram encontrados valores do EMA e REQM relativamente pequenos em relação ao total médio do período, sendo que os índices r e d foram acima de 0,8 indicando respectivamente forte correlação e concordância. Esses índices, juntamente com o NS, revelaram ajustes satisfatórios, utilizando o modelo estável para o outono.

Quanto ao inverno, ao norte, no limite da sub-bacia, o posto Ventania (7321571 - 577877) se moveu da 3ª para a 2ª classe, como consequência do preenchimento dos dados. O posto Pombal (7238688 - 538692), ao oeste, também passou da 4ª para a 3ª classe, indicando que houve redução de até 38 mm da altura pluviométrica, como mostra a Figura 4C quando em comparação aos valores da Figura 4c. Em Terassi e Galvani (2017) o total médio encontrado para o período na área considerada da BRR e na área considerada da SARI foi concordante com os resultados encontrados na Figura 4C. Nitsche et al. (2019) representaram a área com valores similares aos resultados mostrados nas Figuras 4c e 4C.

Pela Tabela 5, notou-se pelo teste de Wilcoxon, que as médias dos valores observados e krigados não apresentaram diferenças

estatisticamente significativas. O EMA e o REQM ficaram próximos de 11 e 19 mm, respectivamente, sendo os menores valores sazonais da SART. Assim como o outono, o índice r e d foram acima de 0,8 apresentando correlação e concordância fortes. Analisando esses índices conjuntamente com o valor do NS, os mesmos apontaram que o modelo estável permitiu estimativas adequadas para período do inverno.

No tocante à primavera, os valores pluviométricos das estações Faxinal grande (7181172 - 602218), Uvaia (7226546 - 561630) e Sumidouro (7231078 - 592506) apresentados na Figura 4d, transitaram da 6ª para a 7ª classe, de acordo com seus valores preenchidos apresentados na Figura 4D. Ao sudoeste, as estações Leal - Faz. Monte alegre (7321776 - 515231) (que apresentou a maior percentagem de falhas 89,6%) e Faz. Santana Sol (7326882 - 515377) (onde se encontrou 87,4% de falhas) passaram da 7ª para a 8ª classe em decorrência do preenchimento dos dados faltantes. Terassi e Galvani (2017) apresentaram valores médios da área considerada na BRR semelhantes aos representados na Figura 4d, bem como os valores na área considerada na SARI, se aproximam dos representados da Figura 4d e 4D. A análise realizada por Nitsche et al. (2019) indicou que há similaridade dos valores pluviométricos encontrados pelos autores com os representados nos mapas das Figuras 4d e 4D.

Na Tabela 5, percebeu-se que os totais médios observados e preenchidos diferiram estatisticamente, conforme o teste de Wilcoxon. Os valores de EMA e REQM, próximos de 16,2 e 28,0 mm, respectivamente, foram relativamente pequenos em relação ao total médio da SART, que foi próximo de 450 mm. Apesar do índice NS ter apresentado um valor mediano, os índices r e d ficaram acima de 0,8 o que apontou para estimativas satisfatórias da precipitação realizadas pelo modelo estável, para a primavera na região avaliada.

A Figura 5 mostra os valores referentes aos totais médios anuais, a qual os mapas se assemelham na representação das classes e na localização das regiões inseridas dentro na SART. Ao norte, o posto Mal (7314385 - 537240) mudou da 4ª (1540-1586 mm) para a 5ª classe (1586-1632 mm) como pode ser observado comparando as Figura 5a e 5A.

Figura 5. Representação espacial pluviométrica anual da SART.

A região ao centro da Figura 5A, delimitada pelas coordenadas Y 7290048 e 7216386, e coordenadas X 601317 e 424418, apresentam as estações Bom jardim. (7268171-552291) e Uvaia (7226546-561630) que passaram da 6ª (1540-1586mm) para a 5ª classe em decorrência do preenchimento dos totais médios anuais.

Na Figura 5a não foram representadas as 8ª e 9ª classes, que se revelaram na Figura 5A, ou seja, a presença dessas classes não foi decorrente do preenchimento de falhas, mas provavelmente um efeito do processo de espacialização, devido à variabilidade dos dados.

Aparecido et al. (2016) avaliando o clima do Paraná, onde estava inclusa a região onde se situa a SART, verificaram que a precipitação ao norte variava entre 1200-1400 mm e ao sul entre 1400-1550 mm, destoando dos resultados exibidos (Figura 5a e 5A) uma vez que na Figura 5a a área com maior precipitação se verificou ao norte, com a Figura 5A apresentando valores muito superiores ao sul e ao leste. Terassi e Galvani (2017) afirmaram que a região considerada na BRR possuía total médio anual de 1515 mm, enquanto que a área tida como sendo da SARI apresentou total médio anual de 1560 mm, havendo

correspondência dessas áreas com as apresentadas na Figura 5a. No levantamento realizado por Nitsche et al. (2019) o período avaliado pelos autores apresentou no geral alturas pluviométricas compatíveis aos resultados mostrados nas Figuras 5a e 5A, porém não houve semelhança na disposição das áreas de menor e maior classes, principalmente na Figura 5A. Posteriormente, num outro trabalho realizado por Terassi et al. (2019) na SARI, foram utilizados 21 postos pluviométricos para o período de 1976 a 2015, onde alguns dos quais apresentaram falhas menores que 5% e que, posteriormente foram preenchidos pelo método de ponderação regional onde constatou-se que o total médio anual era de 1571 mm em regiões vizinhas a SART, que correspondem aos valores dos totais médios nas Figuras 5a e 5A.

A espacialização por isoietas realizadas por Siqueira, Nery e Martins (2018) na Bacia do Paraná, indicou que os menores índices pluviométricos encontrados na da SART, localizam-se ao leste os menores valores, próximos a 1300mm, aumentando a oeste, chegando à 1400mm, havendo, portanto, maior correspondência com a Figura 5A.

Pela Tabela 5, notou-se pelo teste de Wilcoxon, que as médias dos totais anuais

observados e krigados não apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Em relação ao erro sistemático, o EMA e o REQM, próximos de 37 e 58 mm, respectivamente, apresentaram magnitudes maiores por incluir mais meses do que os períodos sazonais, porém, relativamente menores visto que os totais anuais são, conseqüentemente, maiores. Os índices NS, r e d foram os maiores da SART, evidenciando uma adequabilidade muito boa da aplicação do modelo estável para o período anual.

Comparando os resultados encontrados em SBRI e SART nos períodos analisados, observou-se pelas Tabelas 4 e 5, que os períodos, com exceção do verão, apresentaram a mesma consonância em relação aos valores médios analisados pelo teste de Wilcoxon. No verão foi possível verificar nas duas sub-bacias, os maiores valores de EMA e REQM sazonais, enquanto que os menores valores de EMA foram no outono e no inverno, respectivamente. Por outro lado, os menores valores de REQM ocorreram no inverno nas duas sub-bacias. No período anual, verificou-se os maiores valores do coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), índice de eficiência (NS), EMA e REQM de todos os períodos avaliados nas duas sub-bacias. Analisando os indicadores entre as sub-bacias, os melhores resultados foram verificados na SBRI, possivelmente em virtude dela apresentar uma diferença de cerca de 10% a menos no percentual de falhas em relação a SART, significando que o modelo estável apresentou uma pequena sensibilidade em função da quantidade de dados faltantes. Siqueira e Nery (2019) afirmam que a falta de dados pluviométricos no Brasil dificulta bons resultados nas pesquisas realizadas.

Brubacher, Oliveira e Guasselli (2020) avaliaram o preenchimento de falhas em séries temporais de precipitação diária no Rio Grande do Sul, no qual foram utilizados dados de 287 postos pluviométricos com séries completas (2,4% do total) ou parciais no período entre 1987 e 2016. Em seguida, o preenchimento de falhas foi realizado utilizando o método de Regressão Linear Múltipla (RLM) e de Redes Neurais Artificiais (RNA). Por meio da validação dos modelos, notou-se que em áreas com grande densidade de estações, os dois métodos demonstraram bons resultados, porém o desempenho do modelo RLM foi superior às RNA em 76% dos locais analisados, indicando não ser necessário usar um modelo mais complexo.

Diaz, Pereira e Nóbrega (2018) compararam séries históricas mensais entre 1998 e 2013 de dados gerados pelo método de preenchimento de falhas da ponderação regional (PR) com os dados de precipitação estimados pela *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) em

três municípios localizados na bacia do Rio Pajeú (PE) de clima predominantemente semiárido. Assim como o presente trabalho, o estudo apresentou boa correlação entre os dados, sendo de 0,840 em São José do Belmonte, 0,883 em Betânia e de 0,924 em Itapetim. Além disso, os autores afirmam que quando os dados correspondem a períodos secos, os dois métodos ficam próximos entre si e quando os dados correspondem a períodos chuvosos, a diferença entre a estimativa do PR e do TRMM aumenta de forma incisiva, fato que não pode ser afirmado no presente estudo.

Junqueira et al. (2018) também compararam métodos de preenchimento de falha que foram geradas, utilizando séries mensais históricas entre 1968 e 1995 de seis postos pluviométricos localizados na bacia do rio das Mortes (MG). Entre as estatísticas aplicadas, utilizou-se o REQM e NSE, sendo que este se mostrou superior à 0,962 em todas os métodos. A regressão linear obteve os piores valores avaliativos, com REQM de 26,58mm. A regressão múltipla foi a que melhor apresentou resultados, porém sem um teste de média, não há como afirmar se os métodos diferem uns dos outros estatisticamente.

Ao comparar espacialmente os resultados, notou-se que a distribuição sazonal da precipitação ocorreu de maneira diferente nas sub-bacias, visto que os totais médios da SART foram categorizados em menos classes nos períodos de menores e maiores alturas pluviométricas.

De acordo com Rauen et al. (1977), essa diferença é um fator característico em regiões onde se verifica o tipo climático Cfb, como é o caso da região onde está inserida a SART, em relação às regiões de tipo climático Cfa, onde está localizada a SBRI. No que se refere à homogeneidade pluviométrica no Paraná, Fritzsons et al. (2011) afirmaram que a região onde está situada a SBRI, foi classificada como apresentando estiagem no inverno, enquanto que a região onde está localizada a SART a precipitação está distribuída mais uniformemente durante o ano.

No que diz respeito ao período anual, verificou-se que os mapas (Figuras 3 e 5) se mostraram de acordo com a tendência observada sazonalmente nas sub-bacias, onde o verão, outono e inverno da SBRI apresentaram totais médios inferiores aos encontrados na SART, sendo um dos motivos que podem favorecer um maior valor de REQM na mesma. Andrade e Nery (2011) explicam que a SBRI quando comparada bacia inteira do rio Ivaí (que está numa região de clima Cfb), possui os menores valores de precipitação em consequência da orografia, uma vez que está

localizada em áreas de altitudes inferiores em relação ao restante da bacia.

No decorrer da pesquisa de Gerbert, Kist e Virgens Filho (2018) sobre a determinação de regiões de precipitação pluviométrica no estado do Paraná por meio de técnicas de análise multivariada e geoestatística, os autores espacializaram os valores referentes aos 49 postos pluviométricos por meio da krigagem ordinária, usando o modelo gaussiano. A espacialização dos totais médios anuais para o período de 1980 a 2009 indicou que a SBRI apresenta a precipitação próxima a 1750mm, enquanto que na SART a precipitação é de aproximadamente 1600mm, não havendo correspondência com a Figura 3, mas sim com a Figura 5, respectivamente. Entretanto, ao analisar quais os dados dos postos que apresentavam maior similaridade entre si, verificou-se por meio de um dendrograma que ambas as sub-bacias pertenciam ao mesmo grupo de precipitação média mensal, classificado como R3, composto pela região norte, sul, oeste, noroeste, nordeste e sudeste do estado, ou seja, em comparação com a totalidade do estado, as diferenças pluviométricas não foram significativas.

Ao identificarem as regiões pluviométricas homogêneas na bacia hidrográfica do rio Paraná por meio de análise de agrupamento, Malfatti, Cardoso e Hamburger (2018), utilizaram a krigagem ordinária e o modelo exponencial, que se mostrou como mais indicado em comparação ao esférico e gaussiano, para revelar que grande parte da SBRI se encontra na região 7 (média anual de 1569,11mm), enquanto que a SART se divide entre região 7 e a 8 (média anual de 1898,11mm). Os autores afirmaram que ambas as regiões apresentam pouca variação em relação às demais regiões, sendo que a diferença se faz presente na amplitude de precipitação mensal.

Mello e Sampaio (2019) utilizaram dados com até 10% de falhas do período de 1977 a 2006, para conduzirem uma análise geoestatística de precipitação média no estado do Paraná, na qual se testou o modelo de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano. Com base e avaliações estatísticas, o modelo gaussiano foi o que apresentou melhores resultados para 47% dos períodos analisados (mensal, sazonal e anual), entretanto é interessante pontuar que o modelo exponencial apresentou os melhores resultados no verão, janeiro, fevereiro e dezembro, ou seja, nos meses mais chuvosos. Ademais, a precipitação média anual foi especializada selecionando cada um dos modelos. Em todos os modelos a SBRI varia entre 1300mm e 1700mm, com a maior área apresentando valores entre 1400mm e 1600mm, assim como ocorre nas Figuras 4a e 4; no tocante à

SART, observou-se que o modelo gaussiano possui maior correspondência em valores e em distribuição espacial com a Figura 5a, enquanto que tanto o modelo esférico, selecionado por ter o melhor ajuste, quanto o modelo exponencial, a correspondência ocorre com a Figura 5A. Os autores justificam que os postos de maior precipitação ao leste da bacia se localizam próximo à Escarpa devoniana, onde ocorrem chuvas orográficas (Maack, 1981)

Diferentemente do que foi observado no presente trabalho, Qiao et al. (2018) ao comparar o IDW com a krigagem ordinária no estudo de espacialização da poluição de As, afirmou por meio do que foi analisado nos resultados que é difícil identificar completamente as áreas de alta poluição pelo krigagem ordinária, o que mostra que o efeito de suavização do Krigagem ordinária é óbvio, todavia, entende-se com meio da pesquisa realizada por Mello e Sampaio (2019) de que o modelo de semivariograma utilizado influencia na atenuação da representação espacial.

Como complemento da discussão, é pertinente explanar o trabalho de Salton, Morais e Lohmann (2021) que analisaram a ocorrência de períodos secos no estado do Paraná, considerando como período seco o número de dias consecutivos sem chuva (inferior a 1 mm). Para tal, foram utilizados dados diários de precipitação registrados no período de 1977 a 2015 de cento e quarenta e dois postos, que foram acumulados mensal e anualmente para serem expressos em mapas gerados no software ArcGIS 10.2.2, utilizando a interpolação dos dados pelo método de krigagem.

Verificou-se que de modo geral, os períodos secos no Paraná aumentaram de leste para oeste, ou seja, regiões mais altas como a de Ponta Grossa, apresentaram menores registros de períodos secos comparados à região noroeste do estado, devido à influências de sistemas meteorológicos em cada região. Nota-se que no estado do Paraná as secas são pouco frequentes, principalmente as mais prolongadas.

Conclusões

A partir dos resultados encontrados pode-se afirmar que a técnica de krigagem ordinária utilizando o modelo estável, de maneira geral, apresentou um bom desempenho no preenchimento das falhas de dados mensais de precipitação pluviométrica nas sub-bacias do Baixo Rio Ivaí e Alto Rio Tibagi, apesar do modelo estável apresentar uma pequena sensibilidade ao percentual de falhas dos registros históricos.

A espacialização realizada com as séries de dados de pluviosidade das sub-bacias do Baixo Rio Ivaí e Alto Rio Tibagi, gerou padrões

georreferenciados dentro do esperado para os regimes pluviométricos locais, em todos os períodos avaliados, independentemente das regiões de classificação climática onde as mesmas estão inseridas no Estado do Paraná.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES/Fundação Araucária pela concessão da bolsa de mestrado e ao CNPq pelo apoio financeiro no desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

- Alves, K. C. C. L. F., Viola, M. R., Mello, C. R., Giongo, M., Santos, A. F., 2016. Distribuição da precipitação mensal, anual e máxima diária anual na bacia hidrográfica do rio Formoso, Tocantins. *Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais* 12, 49-70.
- Andrade, A. R., Nery, J. T., 2003. Análise da precipitação pluviométrica diária, mensal e interanual da bacia hidrográfica do Rio Ivaí, Brasil. *Investigaciones Geográficas* 52, 7-30.
- Andrade, A. R., Nery, J. T., 2011. Análise sazonal e espacial da precipitação pluvial na bacia hidrográfica do rio Ivaí – Paraná. *Bol. geogr.* 29, 107-121.
- Aparecido, L. E. O., Rolim, G. S., Richetti, J., Souza, P. S., Johann, J. A., 2016. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. *Ciência e Agrotecnologia* 40, 405-417.
- Ataíde, D. H. dos S., Araújo, E. J. G. de, Monte, M. A., Mendonça, B. A. F. de, Silveira, C. E., Albuquerque, A. M., Silva, L. C., 2020. Métodos geoestatísticos e determinísticos na espacialização da altura dominante em povoamento de eucalipto. *Revista de Ciências Agrárias* 43, 98-108.
- Baldo, M. C., 2006. Variabilidade pluviométrica e a dinâmica atmosférica na bacia hidrográfica do rio Ivaí – PR. Tese apresentada ao curso de pós-graduação em Geografia Área de concentração: Desenvolvimento Regional e Planejamento Ambiental, para obtenção do título de doutora em Geografia, da Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 172f.
- Berveglieri, A., Meneguette Junior, M., Piteri, M. A., 2011. Aplicação do interpolador krigagem em modelos digitais de terrenos, comparando-se os casos de isotropia e anisotropia. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011. Curitiba. Anais [...] Curitiba: INPE, 7222-7229.
- Bielenki Junior, C., Santos, F. M., Povinelli, S. C. S., Mauad, F. F., 2018. Alternative methodology to gap filling for generation of monthly rainfall series with GIS approach. *Revista Brasileira Recursos Hídricos* 23, 1-10.
- Bier, A. A., Ferraz, S. E. T., 2017. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas em dados meteorológicos para estações no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 32, 215-226.
- Bortoluzzi, D. D., Prado, G. do, Hara, A. T., Souza, A. C. S., 2019. Precipitação mensal provável no noroeste do Paraná. *Rev. Bras. Agric. Irr.* 13, 3314 – 3326.
- Boudibi, S., Sakaa, B., Zapata-Sierra, A. J., 2019. Groundwater quality assessment using GIS, ordinary kriging and WQI in an arid area. *International Journal of Sciences and Research* 75, 204-226.
- Brasil. LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. *Diário Oficial da União*, 1997.
- Brubacher, J. P., Oliveira, G. G. de, Guasselli, L. A., 2020. Preenchimento de Falhas em Séries Temporais de Precipitação Diária no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia* 35, 335-344.
- Cardoso, C. S., Quadro, M. F. L., 2017. Análise comparativa de dados de precipitação gerados pelo “Climate Prediction Center – CPC” versus dados observados para o Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 10, 1180-1198.
- Chaves, M. E. D., Conceição, K. V. da, Guerrero, J. V. R., 2018. Geostatistical analysis for temperature monitoring in the State of Bahia, Brazil. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* 13, 652-660.
- Cunha Neto, E. M., Nogueira Júnior, M. R., Melo, M. R. da S., Rocha, J. E. C. da., 2019. Eucalyptus spp. volume determined through geospatial interpolation. *Jaboticabal* 47, 434-440.
- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa Produção de Informação/Embrapa Solos, Rio de Janeiro. 412p.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute, 2003. The principles of geostatistical analysis. 306.

- Fatemi, M., Narangifard, M., Beiglou, K. H. B., 2018. A study of the Homogenous Rainfall Zones of Iran Using Cluster Analysis Based on TRMM Satellite Data. *Journal of Hydrosiences and Environment* 2, 26-32.
- Ferreira, I. O., Santos, G. R., Rodrigues, D. D., 2013. Estudo sobre a utilização adequada da krigagem na representação computacional de superfícies batimétricas. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro 5, 831-842.
- Freire, V. H. V., Baldo, M. C., 2017. Variabilidade Pluviométrica na Bacia do Rio Mourão – PR. *Revista Perspectiva Geográfica-Campus Marechal Cândido Rondon* 12, 135-152.
- Fritzsos, E., Mantovani, L.E., Wrege, M.S., Chaves Neto, A., 2011. Análise da pluviometria para definição de zonas homogêneas no estado do Paraná. *RA' GA: o Espaço Geográfico em Análise* 23, 555-572.
- Gebert, D. M. P., Kist, A., Virgens Filho, J. S. das, 2018. Determinação de regiões homogêneas de precipitação pluviométrica no estado do Paraná por meio de técnicas de análise multivariada e geoestatística. *Revista Brasileira de Climatologia* 14, 374-399.
- Giustini, F., Brilli, M., Patera, A., 2016. Mapping oxygen stable isotopes of precipitation in Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 8, 162-181.
- Gouvea, R. L., Campos, C. C., Menezes, J. T., Moreira, G. F., 2018. Análise de frequência de precipitação e caracterização de anos secos e chuvosos para a bacia do rio Itajaí. *Revista Brasileira de Climatologia* 22, 309-324.
- Han, Z., Jianxin, L., Qi, Q., Sun, H., Wang, J., 2019. Radio Environment Map Construction by Kriging Algorithm Based on Mobile Crowd Sensing. *Wireless Communications and Mobile Computing* 4064201, 1-13.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1992. Manual técnico da vegetação brasileira. *Manuais Técnicos em Geociências*. Rio de Janeiro 1, 92p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019. Avaliação da qualidade de dados geoespaciais. Rio de Janeiro.
- Junqueira, R., Amorim, J. S., Oliveira, A. S., 2018. Comparação entre diferentes metodologias para preenchimento de falhas em dados pluviométricos. *Revista Sustentare* 2, 198-210.
- Klauber, C.; Hudak, A. T.; Bright, B. C.; Boschetti, L.; Dickinson, M. B.; Kremens, R. L.; Silva, C. A., 2018. Use of ordinary kriging and Gaussian conditional simulation to interpolate airborne fire radiative energy density estimates. *International Journal of Wildland Fire* 27, 498-499.
- Köppen, W., Geiger, R., 1928. *Klimate der Erde*, Justus Perthes. Gotha.
- Kostopoulou, E., 2020. Applicability of ordinary Kriging modeling techniques for filling satellite data gaps in support of coastal management. *Modeling Earth Systems and Environment* (), 1-14.
- Kumar Adhikary, S., Muttill, N.; Gokhan Yilmaz, A., 2016. Ordinary kriging and genetic programming for spatial estimation of rainfall in the Middle Yarra River catchment, Australia. *Hydrology Research* 47, 1182-1197.
- Landim, P. M. B., 2006. Sobre Geoestatística e mapas. *Terra Didática* 2, 19-33.
- Lemos, A. C. C., Sandanha, D. L., Mafra, A. L., 2018. Comportamento da Precipitação Pluviométrica nas Porções Alta e Média da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas/SC: Análise Temporal de 1986-2016. *Revista Brasileira de Geografia Física* 11, 1264-1274.
- Maack, R. *Geografia física do Estado do Paraná*. 2.ed. Rio de Janeiro: Secretaria da Cultura e do Esporte do Governo do Estado do Paraná, 1981, 438p.
- Machado, R. L., Ceddia, M. B., Carvalho, D. F., Cruz, E. S., 2010. Spatial variability of maximum annual daily rain under different return periods at the Rio de Janeiro state, Brazil. *Bragantia* 69, 77-84.
- Malfatti, M. G. L., Cardoso, A. de O., Hamburguer, D. S., 2018. Identificação de regiões pluviométricas homogêneas da bacia hidrográfica do rio Paraná. *Geociências* 37, 409-421.
- Marciano, A. G., Barbosa, A. A., Silva, A. P. M., 2018. Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada. *Rev. Ambient. Água* 13. 1-9.
- Martins, F. B., Gonzaga, G., Santos, D. F., & Reboita, M. S., 2018. Classificação climática de Koppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. *Revista Brasileira de Climatologia* 1, 129-156.
- Mello, Y. R. de., Sampaia, T. V. M., 2019. Análise geoestatística da precipitação média para o estado do Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia* 25, 643-660.
- Molina-Sanches, I., Lázaro, R., Arnau-Rosalén, E., Calvo-Cases, A., 2016. Rainfall timing and runoff: The influence of the criterion for rain event. *J. Hydrol. Hydromech* 64, 226-236.
- Morais, R. C. S., Araújo, I. R. G., 2015. Análise espacial da concentração de sólidos totais dissolvidos (STD) em águas subterrâneas da região Norte do Piauí. *Revista Equador (UFPI)* 4, 67-80.

- Mukesh, R., Soma, P., Karthikeyan, V., Singhu, P., 2019. Prediction of ionospheric vertical total electron content from GPS data using ordinary kriging-based surrogate model. *Astrophys Space Sci* 364, 1-21.
- Nas, B., Berktaç, A., 2010. Groundwater quality mapping in urban groundwater using GIS. *Environ Monit Assess* 160, 215-227.
- Nascimento, M. B. do, Silva, T. J. R. D. da, Paiva, W. de, Santos, L. L. dos, Araújo, L. E. de, 2021. Análise da Variabilidade Pluviométrica na Microrregião do Curimataú Ocidental, Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14, 82-93.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282-290.
- Nitsche, P. R., Caramori, P. H., Ricce, W. S., Pinto, L. F. D., 2019. Atlas Climático do Estado do Paraná. Londrina, PR, 216.
- Pires, C. A. F., Reis, J. T., Dullius, A. I. S., Priesnitz, M. C., Pereira, M. J., 2016. Krigagem ordinária aplicada à precipitação pluviométrica nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *Ciência e Natura* 38, 1303-1311.
- Pereira, V. A. S., Pugliesi, E. A., Flores, E. F., Camargo, P. O., 2018. Krigagem ordinária e visualização de incertezas aplicadas no monitoramento de irregularidades ionosféricas no Brasil. *Rev. Bras. de Cartografia* 70, 967-996.
- Qiao, P., Lei, M., Yang, S., Yang, J., Guo, G., Zhou, X., 2018. Comparing ordinary kriging and inverse distance weighting for soil as pollution in Beijing. *Environ Sci Pollut Res* 25, 15597-15608.
- Rauen, M. J., Larach, J. O. I., Carvalho, A. P., Cardoso, A., Hochmuller, D. P., Fasolo, P. J., 1977. Levantamento de reconhecimento dos solos no litoral do estado do Paraná (Área 11). Curitiba: Empraba Solos, 129.
- Righi, E., Basso, L. A., 2016. Aplicação e análise de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas. *Ambiência Guarapuava (PR)* 12, 101 - 117.
- Salton, F. G., Morais, H., Lohmann, M., 2021. Períodos Secos no Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Meteorologia* (), 1-9.
- Santos, R. A. dos, Martins, D. L., Santos, R. L., 2018. Balanço hídrico e classificação climática de Koppen e Thornthwaite no município de Feira de Santana (BA). *Geo UERJ* 33, 1-17.
- Sardinha, D. S., Pena, Y. T. L., Tiezzi, R.O., Almeida, M. C. J., 2016. Base de dados de desastres naturais no município de Poços de Caldas/MG: ferramenta para o planejamento e a gestão territorial. *URBE - Revista Brasileira de Gestão Urbana* 8, 318-331.
- SEMARH. Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2010. *Bacias Hidrográficas do Paraná: Série Histórica*. Curitiba, 140.
- Silva, T. P., Rodrigues, R. A., Delgado, R. C., Oliveira, L. J. C., Sarmiento, A. P., 2018. Métodos de interpolação espacial do regime pluviométrico no espaço urbano de Catalão, Goiás. *Revista Brasileira de Geografia Física* 11, 745-757.
- Siqueira, B.; Nery, J. T., Martins, G., 2018. Análise da distribuição e variabilidade da precipitação na bacia do rio Paraná, Brasil. *Geosp – Espaço e Tempo (Online)* 22, 380-393.
- Siqueira, B., Nery, J. T., 2019. Analysis of daily precipitation in the State of Paraná. *Mercator (Fortaleza Online)* 18, 01-14.
- Stein, A., Corsten, L. C. A., 1991. Universal Kriging and Cokriging as a Regression Procedure. *Biometrics* 47, 575-87.
- Terassi, P. M. de B., Galvani, E., 2017. Identification of homogeneous rainfall regions in the eastern watersheds of the State of Paraná, Brazil. *Climate* 5, 53-65.
- Terassi, P. M. de B., Silveira, H., Oliveira-Júnior, J. F. de, 2017. Variabilidade pluviométrica e a erosividade das chuvas na unidade hidrográfica Pirapó, Parapanema III e IV – Paraná. *RAEGA: o Espaço Geográfico em Análise* 39, 76-91.
- Terassi, P. M. de B., Biffi, V. H. R., Galvani, E., Oliveira-Júnior, J. F. de, 2019. Estimativas de erosividade e as precipitações diárias extremas na bacia hidrográfica do rio alto Iguaçu – Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia* 25, 242-265.
- Vieira, S. A., Osorio, D. M. M., Quevedo, D. M., Adam, K. N., Pereira, N. A. F., 2018. Metodologia de imputação de dados hidrometeorológicos para análise de séries históricas- bacia do rio dos Sinos, RS, Brasil. *Rev. Bras. Clim.* 23, 189-204.
- Vargas, T. de., Gomes, M. G., Belladonna, R., Adami, M. V. D., 2018. Aplicação do Interpolador IDW para Elaboração de Mapa Hidrogeológicos Paramétricos na Região da Serra Gaúcha. *Scientia Cum Induntria* 6, 38-43.
- Willmott, C. J., Ckesson, S. G., Davis, R. E., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research* 90, 8995-9005.
- Yamamoto, J. K., Landim, P. M. B. 2013. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de textos, 215.