

Estimativas Espaciais: Qualidade e Correlação dos Interpoladores Espaciais Inverso do Quadrado da Distância e Krigagem

Spatial Estimates: Quality and Correlation of Distance Square Inverse Spatial Interpolators and Kriging

Felipe Pacheco Silvaⁱ

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, Brasil

Resumo: A interpolação espacial auxilia na análise de fenômenos espaciais, porém são escassos estudos comparativos avaliando os parâmetros de precisão, suavização, configuração e universalização dos métodos. Assim, buscou-se avaliar a qualidade e a correlação das estimativas espaciais por meio do modelo determinístico inverso do quadrado da distância (IQD) e do modelo geoestatístico da krigagem em diferentes grupos quantitativos de amostras. Além disso, a avaliação da qualidade da interpolação foi realizada em distintos *softwares* e em diferentes bases de dados. Os procedimentos operacionais para este estudo comparativo foram executados em ambiente de SIGs. Os resultados apontam um aumento do erro médio para um cenário com poucas amostras nos *softwares* analisados, porém o erro é mais pronunciado no ArcGis (86%) e menor no Spring (61%). Com relação à comparação entre os métodos e *softwares*, constatou-se uma significativa redução da correlação com a diminuição do universo amostral em todos os cenários analisados.

Palavras-chave: Interpoladores Geoestatísticos; Distinta Amostragem; Estudo Comparativo.

Abstract: Spatial interpolation assists in the analysis of spatial phenomena, however there are few comparative studies evaluating parameters for precision, smoothing, configuration and universality of methods. Consequently, the quality and correlation of spatial estimates of deterministic inverse distance squared (IDS) models and geostatistical models of kriging in different sample universes, the quality of kriging performed in different software and data sources are evaluated in this article. The operational procedures for this comparative study were performed in a GIS environment. The results point to an increase in the average error for scenarios with small samples in the analyzed software, but the error is more pronounced in ArcGis (86%), and lower in Spring (61%) programs. In reference to comparison between methods and software, a significant reduction in correlation was found to exist with the reduction of the sample universe in all analyzed scenarios.

Keywords: Geostatistical Interpolators; Distinct Sampling; Comparative Study.

ⁱ Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia. felippe.pacheco@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5059-1740>

Introdução

Interpoladores espaciais têm tido uma importância crescente no âmbito dos diversos campos científicos destinados a compreensão das dinâmicas de fenômenos e processos naturais que tenham repercussões vinculadas ao seu posicionamento espacial, promovendo estimativas espaciais convertendo informações discretas em contínuas. Entre os campos que empregam técnicas de estimativa espacial pode se destacar a climatologia, geologia ambiental, pedologia, hidrologia, demografia, assim como os campos ligados a temáticas urbanas e rurais.

O destaque da interpolação de dados deve-se em grande parte à eliminação do “efeito mosaico” presente nas mais variadas representações espaciais e, conseqüentemente, colabora para chamar a atenção para as principais concentrações espaciais de determinado atributo, suavizando suas diferenças (JAKOB e YOUNG, 2006). Assim, o mapa apresenta com muito mais clareza e objetividade as suas informações essenciais, sugerindo tendências e dinâmicas espaciais.

O termo geoestatística foi primeiramente empregado por Georges Matheron (1963), a partir dos trabalhos dos estatísticos H. J. de Wigs e Daniel G. Krige, formulando, então, a ‘Teoria das Variáveis Regionalizadas’, que é o fundamento da Geoestatística (YAMAMOTO, 2013). Matheron (1963) define geoestatística, em seu sentido amplo, com o estudo da distribuição espacial de variáveis geológicas e/ou naturais, tais como teor, espessura e acumulação. Nesse sentido, Landim (2006) aponta que a geoestatística nasce da preocupação de se entender os fenômenos interpretados como regionais, a partir da análise matemática, da gênese e leis naturais.

Assim, a estimativa das variáveis deve se ater à integração das “informações e relações, a partir de um conjunto discreto de amostras, juntamente com a avaliação dos erros de estimativa, com objetivo de estabelecer o grau de segurança em previsões e os padrões ótimos de amostragem, que assegure que um erro máximo de estimativa não seja excedido” (LANDIM, 2006, p. 22).

Waldo Tobler (1979) aponta que a primeira lei da Geografia é que “no mundo, todas as coisas se parecem, mas coisas mais próximas são mais parecidas que aquelas mais distantes”, este é um princípio básico compartilhado por todos métodos de interpolação, isto é, de que pontos mais próximos tendem a ter propriedade mais semelhantes do que pontos alocados mais distantes. Por outro lado, Landim (2006) aponta que as variáveis, por consubstanciarem uma característica ‘aleatória’ apresentam irregularidades e variação imprevisível de um ponto para outro e a partir da sua característica ‘estrutural’, uma vez que apresenta relações existentes entre os pontos no espaço decorrentes de sua origem.

Os interpoladores espaciais podem ser agrupados a partir do método em dois grandes grupos: determinísticos e probabilísticos. Conforme Burrough (1986), os interpoladores com métodos determinísticos são baseados diretamente nos valores observados nos pontos vizinhos ao ponto de interesse, desconsiderando a estrutura de dependência espacial da variável, se presente, enquanto os métodos probabilísticos (ou geoestatísticos) são modelos estatísticos que incluem a autocorrelação, a qual expressa a intensidade de similaridade entre as amostras medidas em relação a distância e direção.

Dirks et al. (1998), em um estudo comparativo buscando identificar quais interpoladores espaciais melhor representariam as chuvas anuais, mensais, diárias e horárias para a Ilha de Norfolk, na Nova Zelândia, concluíram que os métodos krigagem e inverso do quadrado distância corroboraram para resultados mais eficazes em relação aos demais estimadores. Jakob e Young (2006) demonstraram a superioridade da krigagem frente aos demais métodos de interpolação utilizando combinação linear de dados sociodemográficos. Mello et al. (2003) também identificaram menores erros de interpolação com a krigagem para dados pluviométricos, ao comparar modelos básicos, lineares e exponenciais para estimativa de chuvas intensas.

Landim (2000) introduz algumas questões que devem ser levadas em consideração no que concerne à avaliação dos métodos de interpolação: a) existe um método “melhor” que outro? b) quão fiel aos dados originais é o resultado obtido? c) a superfície estimada representa uma solução plausível? d) o resultado é esteticamente agradável?

Uma interpolação ideal seria aquela na qual a superfície interpolada apresenta as seguintes características: (1) ajusta-se aos dados a um determinado nível de precisão, ou seja, é fiel aos dados dentro de um limite arbitrário definido pelo usuário; (2) a referida superfície interpolada deve ser contínua e suave em todos os locais, ou seja, tem um gradiente finito em todo local onde a interpolação for necessária; (3) cada valor interpolado depende apenas do subgrupo local de dados, e os membros deste subgrupo são determinados somente pela configuração dos dados que, de algum modo, são próximos ao ponto interpolado; e (4) um outro aspecto a ser levado em consideração é se o método de interpolação pode ser aplicado a todas as configurações e padrões de densidade dos dados (LANDIM, 2000).

Na busca de contribuir com este debate esta pesquisa assume os seguintes objetivos:

- a) averiguar a correlação da krigagem executada na plataforma Spring (versão 5.1.8) com a realizada na plataforma ArcGis (versão 10.3.1);
- b) discutir a qualidade e a correlação das estimativas espaciais realizadas, através do modelo determinístico inverso do quadrado da distância (IQD) e do modelo geoestatístico da krigagem em diferentes grupos quantitativos de amostras.
- c) comparar as estimativas espaciais do gradiente hidráulico (GH) geradas a partir da drenagem de diferentes fontes de dados.

Proposto por Rodriguez (1993), o Gradiente Hidráulico (GH) permite discernir blocos com características hidráulicas distintas, sendo que, ao se eliminar as drenagens de primeira ordem – estas que estariam diretamente ligadas ao mecanismo erosivo atual –, se realçam as feições controladas por aspectos estruturais pretéritos. Desse modo, este parâmetro geomorfométrico permite subsidiar a compreensão da modelagem do terreno, a partir da estruturação tectono-erosiva em escala de longo termo.

Metodologia

Estruturação do Plano de Informações

A área de estudo selecionada para a presente pesquisa foi a bacia hidrográfica do Rio Xopotó e adjacências, situada na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais. O pla-

no de informações que deu origem ao Gradiente Hidráulico (GH) foi composto pela organização dos arquivos vetoriais correspondentes à hidrografia das 9 cartas topográficas do IBGE, na escala de 1/50.000, que abrangem a área de estudo: Senador Firmino (SF-23-X-B-IV-4), Viçosa (SF-23-X-B-V-3), Ervália (SF-23-X-B-V-4), Mirai (SF-23-X-D-II-2), Ubá (SF-23-X-D-II-1), Tocantins (SF-23-X-D-I-2), Rio Pomba (SF-23-X-D-I-4), Astolfo Dutra (SF-23-X-D-II-3) e Cataguases (SF-23-X-D-II-4). Em seguida, de posse do arquivo de hidrografia, se obteve a hierarquia fluvial, conforme proposta de hierarquização fluvial de Strahler (1952). Em seguida, identificou-se 1413 segmentos de segunda ordem hierárquica.

A partir do MDE SRTM – *Arc-Second Global* 2ª versão, com resolução espacial de 1 arc seg. (aproximadamente 30m), em formato *Geotiff* e disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS), que é um modelo hidrologicamente inconsistente, se obteve a hierarquia fluvial, segundo as concepções defendidas por Strahler (1952), de modo automático utilizando as ferramentas da extensão '*Hidrology*' do *software* ArcGis que permitiram reconhecer 1.332 canais de segunda ordem.

Cálculo do Gradiente Hidráulico

O Gradiente Hidráulico (GH) é obtido para as drenagens de 2ª ordem, segundo a concepção de Rodriguez (1993), sendo o valor do GH calculado a partir da Equação 1:

$$GH = [(hc - hf) / d] * 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que: hc = altitude da cabeceira; hf = cota da foz; d = distância da cabeceira à foz da drenagem.

As informações altimétricas foram obtidas do MDE SRTM, uma vez que compreendeu-se que o erro altimétrico desse modelo não traria ônus significativos. Barros & Cruz (2007), ao verificarem a qualidade das informações altimétricas para a 1ª versão MDE SRTM, obtiveram resultados satisfatórios quanto ao desempenho altimétrico do modelo em análise, constando-se uma diferença média de 4,8 metros, com desvio padrão (σ) de 10,1 metros, o que se apresenta como uma margem de erro aceitável para a escala original adotada no presente trabalho (1:50.000).

O procedimento para se definir o GH consistiu envolveu as seguintes etapas: i) conversão das feições lineares para pontos; ii) seleção dos pontos extremos de cada drenagem; (iii) inserção das informações de altitude da cabeceira (hc) e altitude da foz (hf); iv) organização e cálculo final na planilha eletrônica do Excel©; v) por fim, se inseriu os valores de gradiente hidráulico em cada um dos canais para posterior interpolação.

Organização dos Diferentes Grupos Quantitativos de Amostras para o GH

Optou-se por realizar a krigagem em diferentes *softwares* para diferentes números de amostras a partir do GH identificado a partir da drenagem de 2ª ordem extraída dos arquivos vetoriais do IBGE por compreendermos que, por serem derivados de um levantamento sistemático, conferem uma maior fidelidade ao quadro ambiental. Nesse sentido,

as 1413 amostras foram a base para os procedimentos realizados com esta perspectiva comparativa. Este conjunto amostral foi nomeado de 'GH1'.

Inicialmente, se desagregou 10% do total das 1413 amostras, isto é, 141 amostras para compor o grupo quantitativo menor, denominando de 'GH2'. Esta estratégia buscou verificar o rigor e correspondência dos métodos do IQD e krigagem para diferentes grupos quantitativos de amostras, isto é, um universo amostral robusto e outro com menor robustez, assim como em diferentes *softwares*, no caso o ArcGis e Spring. A seleção do universo amostral menor foi realizada aleatoriamente, a partir do comando 'Create Random Selection', disponível na extensão *HawthsTools*.

Interpolação Geoestatística no ArcGis e Spring

Para ambos conjuntos amostrais 'GH1' e 'GH2' se realizou krigagem ordinária, como modelo de ajuste exponencial com 5 *lags*, no entanto para o conjunto 'GH1' o melhor ajuste do semivariograma se deu com incremento de 1440, enquanto, para o grupo amostral 'GH2', o melhor ajuste do semivariograma se deu com um incremento de 1500 inseridos na extensão *Geostatistical Analyst*.

No Spring a interpolação geoestatística também se deu por krigagem ordinária, com ajuste do semivariograma pelo modelo exponencial. Para 'GH1' adotou-se 5 *lags*, com incremento de 1440 que contribuiu para um ajustamento adequado do semivariograma, para 'GH2' se adotou apenas 4 *lags* e um incremento de 3000 para um melhor ajustamento. Pelo fato de ambos conjuntos amostrais serem isotrópicos e dispõem de uma amostragem irregular se adotou apenas uma direção de 0°.

Avaliação da Correlação de Diferentes Planos de Informações

A interpolação dos conjuntos amostrais em questão se deu através do método do 'Inverso do Quadrado da Distância', na potência 2, com raio de busca de 2,5 km e considerando para cada conjunto amostral cerca de 10% do total como valor de número de pontos mais próximos a serem interpolados. O grupo amostral do GH obtido pelo SRTM foi de 1332 dados, enquanto os dados do IBGE foram de 1413 dados. Apenas esta diferença do número de dados já se mostra como elemento desfavorável à utilização dos dados de GH obtidos pelo MDE SRTM.

Nesse sentido, a comparação para ambos produtos oriundos da interpolação se deu a partir da subtração dos mesmos através da ferramenta 'Álgebra de Mapas' do ArcGis, o que permitiu verificar a correspondência e correlação. No mesmo sentido, se inscrevem os gráficos de valores estimados e observados gerados pela extensão *Geostatistical Analyst*.

Mensuração do Erro Médio da Interpolação em Distintos Grupos Quantitativos de Amostras

Especificamente para análise dos erros para o conglomerado de amostras 'GH1' e 'GH2' se desagregou 5% das amostras para cada conjunto de dados, de modo que os mesmos não fossem processados pelos respectivos interpoladores e permitissem a valida-

ção. A respectiva seleção também se deu de modo aleatório, a partir do comando 'Create Random Selection', disponível na extensão *HawthsTools*.

Assim sendo, para o grupo 'GH1', cerca de 71 amostras foram recolhidas antes do cruzamento dos dados, sendo estes 71 dados os valores das variáveis reais. Portanto, a interpolação de IQD e krigagem para este grupo amostral maior foi feita para os 1342 dados restantes. Do mesmo modo, para o grupo amostral 'GH2', 7 amostras foram recolhidas, de modo que a interpolação fosse realizada para as 134 amostras restantes.

Os erros foram calculados em conformidade com as Equações 2 e 3, propostas de Dirks et al. (1998) e Mello et al. (2001):

$$e = [(V_R - V_P) / V_P] * 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$e_m = [(\sum e) / n] \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde VR = valor da variável real; VP = valor da variável predita; e: erro (%); Em: erro médio (%); n: número de dados.

A variável VP para os produtos resultados da interpolação processada na extensão *Geostatistical Analyst* foi extraída com auxílio da ferramenta 'Validação/Predição' que permitiu comparar o valor GH de cada grupo amostral das amostras reais separadas com o GH predito pelos interpoladores espaciais.

Para os produtos oriundos da krigagem realizada no Spring a obtenção dos dados de VP foi feita com recursos do *software* ArcGis. Primeiramente, se inseriu no ArcGis, em formato GEOTIFF, os produtos da krigagem realizada no Spring. Posteriormente, se interpolou os dados das amostras reais com cada produto a partir da ferramenta 'Interpolador Shape', e em seguida, se utilizou a ferramenta 'Adicionar Informações de Superfície' selecionada a feição linear gerada anteriormente e o produto matricial corresponde à interpolação que se requer as informações espaciais, ambas ferramentas se dispõem no seguinte caminho: ArcToolBox>Ferramentas do 3D Analyst>Superfície Funcional.

Correlação entre as Estimativas Espaciais para Diferentes Grupos Quantitativos de Amostras

A correlação entre as estimativas espaciais foi averiguada com auxílio dos recursos do *software* ArcGis, a partir deste foi realizada a integração de todas as estimativas espaciais oriundas das estratégias de interpolação adotadas no presente trabalho. Os dados foram recortados pela ferramenta 'Extração por Máscara', de modo que todos os arquivos estivessem dentro limites geográficos definidos pelas coordenadas UTM (Unidade Transversa de Mercator) de latitude sul (S) 7691455,849540 m e 7640458,557824 m e longitude oeste (W) 701602,700475 m e 756571,224888 m.

Em seguida, se utilizou a ferramenta de 'Calculadora de Raster' para realizar a comparação por subtração dos arquivos matriciais. A primeira comparação foi para as amostras 'GH1', que reúnem 1342 valores de gradiente hidráulico, se buscou inicialmente verificar a correspondência da interpolação realizada pelo método IQD com a krigagem, empreendida por meio extensão *Geostatistical Analyst*. Ainda para este universo amostral se destinou

verificar a correspondência da krigagem elaborada pela extensão *Geostatistical Analyst*, no ArcGis com a preferida em ambiente de Spring. Nesse intuito, também se buscou identificar a correlação da krigagem realizada no Spring com a interpolação feita pelo IQD.

Por fim, a mesma rotina comparativa foi empregada para os produtos resultantes das estimativas espaciais realizadas a partir das amostras 'GH2' com intuito de identificar o comportamento da correlação em um grupo amostral menor. Na Figura 1 são ilustrados os esforços comparativos levados a efeito neste estudo.

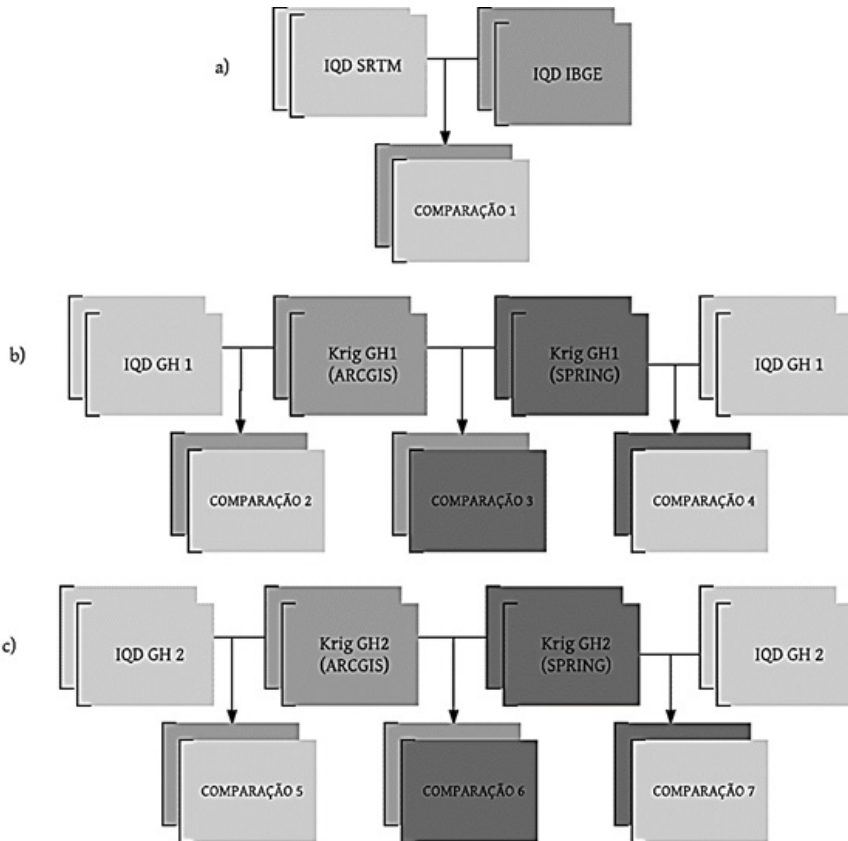


Figura 1 – Esquema síntese das rotinas comparativas executadas no presente estudo.

Resultados e Discussões

Avaliação da Interpolação em Diferentes Bases de Dados

A primeira ação foi comparar as estimativas espaciais do GH obtidas de bases dados distintas, sendo a primeira interpolação oriunda da drenagem vetorial do Instituto Brasilei-

ro de Geografia e Estatísticas (IBGE), a segunda interpolação foi derivada da drenagem do Modelo Digital de Elevação (MDE) da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Visualmente as estimativas espaciais por IQD oriundas de diferentes planos de informações apresentam uma boa correlação (Figura 2), denotando notável coerência na representação de valor mais elevado de GH para os contrafortes escarpados da área estudada. Dessa forma que para estudos de uma abrangência regional e com baixa necessidade de acuraria a interpolação a partir de dados do MDE SRTM pode atender os objetivos almejados.

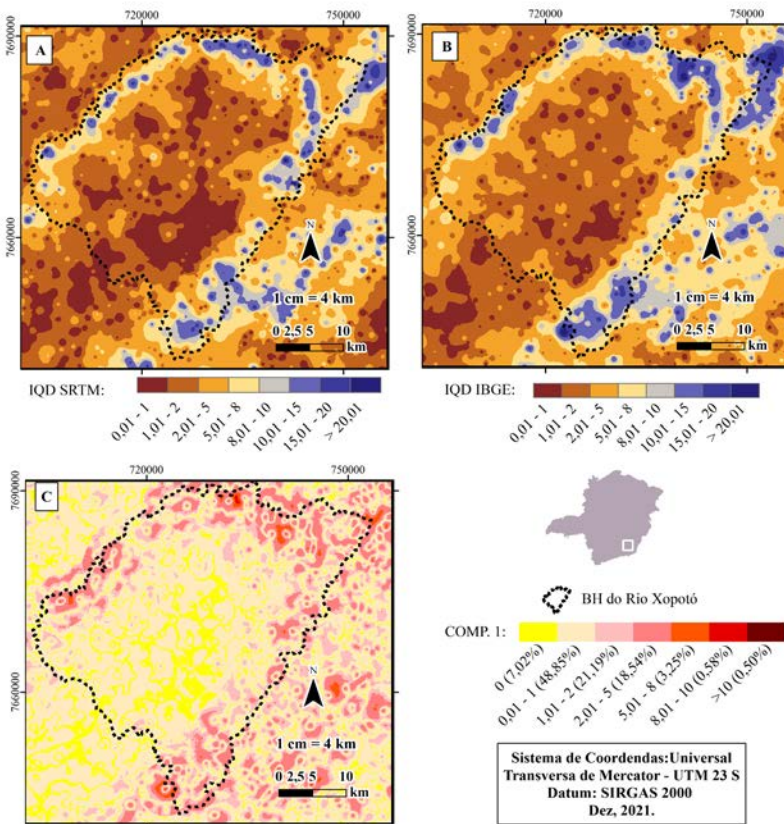


Figura 2 – Comparação da interpolação do IQD do GH obtido a partir do MDE SRTM e do IQD realizado com dados do IBGE. a) IQD MDE SRTM; b) IQD IBGE; c) Comparação 1.

Contudo, para uma interpolação mais coerente e em uma escala de detalhe os dados podem contribuir com uma interpretação errônea das peculiaridades do fenômeno observado, uma vez que houve uma correlação de apenas 7% entre as bases de dados. Logo, é importante avaliar os objetivos do estudo e interpolação dado que o uso indiscri-

minado dessas bases conjuntamente pode apresentar inconsistências em termos hidrológicos. A Figura 3 apresenta uma síntese das diferenças entre as bases de dados.

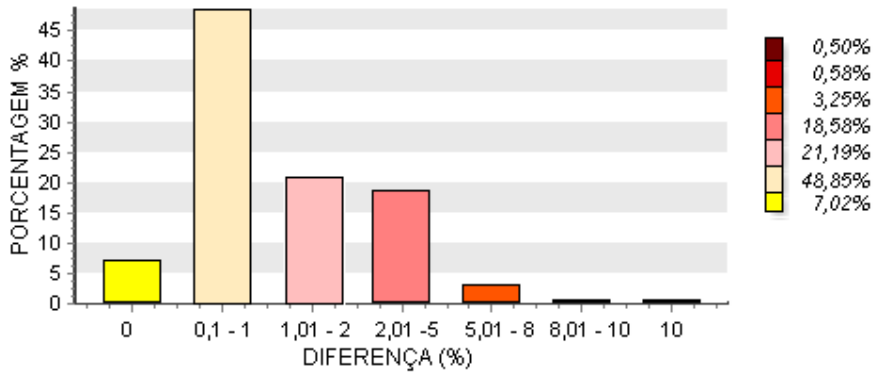


Figura 3 – Síntese gráfica da comparação entre IQD- MDE SRTM com o IQD-IBGE.

Avaliação do erro médio em diferentes amostras e softwares

Estudar os erros médios permite evidenciar qual interpolador espacial confere uma melhor predição do GH para diferentes universos amostrais. Nesse sentido, se apresenta o Quadro 1 que reúne os erros para cada amostra recolhida no universo amostral 'GH1'.

Quadro 1 – Comparação dos valores reais e valores estimados pelos métodos do Inverso do Quadrado da Distância, Krigagem do ArcGis e Krigagem do Spring para as amostras dissociadas do conjunto amostral 'GH1'

ID	GH _{Real}	GH _{IQD-ArcGis}	GH _{Krig-ArcGis}	GH _{Krig-Spring}	Erro _{IQD-ArcGis}	Erro _{Krig-ArcGis}	Erro _{Krig-Spring}
1	0,44	1,17	1,18	1,15	62,39	62,71	61,74
2	5,64	2,19	2,21	2,59	157,53	155,20	117,76
3	1,81	1,7	1,35	1,04	6,47	34,07	74,04
4	6,75	0,89	1,32	1,45	658,43	411,36	365,52
5	8,68	4,53	4,47	4,52	91,61	94,18	92,04

ID	GH _{Real}	GH _{IQD-ArcGis}	GH _{Krig-ArcGis}	GH _{Krig-Spring}	Erro _{IQD-ArcGis}	Erro _{Krig-ArcGis}	Erro _{Krig-Spring}
6	1,09	2,79	2,86	2,97	60,93	61,89	63,30
7	4,35	4,84	5,7	5,68	10,12	23,68	23,42
8	3,9	2,09	2,25	2,16	86,60	73,33	80,56
9	0,25	1,91	2,6	2,97	86,91	90,38	91,58
10	2,65	1,77	2,84	2,92	49,72	6,69	9,25
11	1,26	3,79	3,06	2,71	66,75	58,82	53,51
12	1,66	4,23	4,13	4,03	60,76	59,81	58,81
13	5,33	6,75	6,55	6,72	21,04	18,63	20,68
14	0,47	1,16	1,14	0,99	59,48	58,77	52,53
15	0,15	9,44	9,83	9,75	98,41	98,47	98,46
16	10,71	10,52	10,58	10,76	1,81	1,23	0,46
17	3,87	3,01	3,02	2,69	28,57	28,15	43,87
18	0	4,73	5,47	5,25	100,00	100,00	100,00
19	2,19	4,57	4,59	4,69	52,08	52,29	53,30
20	1,15	1,69	1,59	1,45	31,95	27,67	20,69
21	1,79	2,03	2,02	2,13	11,82	11,39	15,96
22	10,1	10,33	9,89	9,45	2,23	2,12	6,88
23	8,91	4,63	4,83	5,13	92,44	84,47	73,68
24	2,89	0,97	1,04	1,06	197,94	177,88	172,64
25	2,19	3,27	3,08	3,26	33,03	28,90	32,82
26	11,31	7,35	7,66	8,01	53,88	47,65	41,20
27	9,04	7,54	7,9	7,58	19,89	14,43	19,26

ID	GH _{Real}	GH _{IQD-ArcGis}	GH _{Krig-ArcGis}	GH _{Krig-Spring}	Erro _{IQD-ArcGis}	Erro _{Krig-ArcGis}	Erro _{Krig-Spring}
28	2,92	0,98	1,22	1,17	197,96	139,34	149,57
29	0,33	1,35	1,46	1,13	75,56	77,40	70,80
30	5,58	5,46	5,54	5,98	2,20	0,72	6,69
31	4,17	2,14	2,13	1,89	94,86	95,77	120,63
32	5,45	6,53	9,42	10,81	16,54	42,14	49,58
33	3,65	2,01	2,04	2,23	81,59	78,92	63,68
34	3,2	4,57	4,33	4,35	29,98	26,10	26,44
35	12,3	16,67	16,8	17,3	26,21	26,79	28,90
36	16,25	11,64	9,25	9,28	39,60	75,68	75,11
37	7,8	9,51	9,36	9,84	17,98	16,67	20,73
38	2,39	4,04	3,89	3,83	40,84	38,56	37,60
39	3,75	2,2	2,23	1,99	70,45	68,16	88,44
40	3,27	1,99	2,06	1,78	64,32	58,74	83,71
41	9,03	5,91	6,72	7,24	52,79	34,38	24,72
42	0,45	5,01	5,3	5,33	91,02	91,51	91,56
43	8,96	4,93	4,71	4,49	81,74	90,23	99,55
44	0	3,39	3,59	3,56	100,00	100,00	100,00
45	0,47	3,56	3,96	3,91	86,80	88,13	87,98
46	1,18	8,28	7,87	7,56	85,75	85,01	84,39
47	5,91	7,51	7,39	8,31	21,30	20,03	28,88
48	12,27	11,21	11,8	11,97	9,46	3,98	2,51
49	16,45	11,49	11,82	12,65	43,17	39,17	30,04

ID	GH _{Real}	GH _{IQD-ArcGis}	GH _{Krig-ArcGis}	GH _{Krig-Spring}	Erro _{IQD-ArcGis}	Erro _{Krig-ArcGis}	Erro _{Krig-Spring}
50	15,06	3,6	4,66	4,08	318,33	223,18	269,12
51	5,06	4,1	3,11	2,83	23,41	62,70	78,80
52	6,7	9,51	7,83	7,77	29,55	14,43	13,77
53	0,97	2,96	2,45	2,13	67,23	60,41	54,46
54	1,02	2,42	2,79	2,89	57,85	63,44	64,71
55	7,14	7,6	8	8,36	6,05	10,75	14,59
56	3,13	2,52	2,5	2,56	24,21	25,20	22,27
57	1,52	1,39	1,42	1,14	9,35	7,04	33,33
58	17,35	13,12	12,31	13,02	32,24	40,94	33,26
59	3,15	4,07	4,17	4,59	22,60	24,46	31,37
60	4,44	4,61	3,84	3,62	3,69	15,63	22,65
61	9,49	7,71	8,6	9,2	23,09	10,35	3,15
62	6,25	3,46	5,98	6,47	80,64	4,52	3,40
63	5,15	4,97	5,19	5,35	3,62	0,77	3,74
64	6,47	4,46	3,42	3,17	45,07	89,18	104,10
65	16,39	7,42	6,91	7,45	120,89	137,19	120,00
66	6,13	11,4	10,63	10,53	46,23	42,33	41,79
67	21,6	17,23	14,79	15,34	25,36	46,04	40,81
68	2,79	2,42	2,2	2,22	15,29	26,82	25,68
69	1,95	2,1	2,1	2,2	7,14	7,14	11,36
70	0,65	1,34	1,35	1,18	51,49	51,85	44,92
71	1,32	1,91	1,77	1,71	30,89	25,42	22,81
Erro Médio:					63,98	57,64	59,15

(GH = Gradiente Hidráulico; IQD = Inverso do Quadrado da Distância; Krig. = Krigagem.)

No Quadro 1 observa-se que a krigagem realizada no ArcGis apresentou o menor erro médio (57,64%), enquanto o método determinístico do IQD apresentou o maior erro médio (63,98%), já a interpolação geoestatística executada na plataforma Spring apresentou um erro médio de 59,15%. Dessa forma, podemos constatar que, para um conjunto maior de amostras, a interpolação geoestatística se apresenta como uma opção mais adequada, seguida pela interpolação realizada pelo Spring.

O Quadro 2 apresenta a avaliação dos erros para o conjunto amostral 'GH2', no qual foram extraídas 7 amostras para evidenciar a predição das estimativas espaciais, e seus respectivos erros.

Quadro 2 – Comparação dos valores reais e valores estimados pelos métodos do Inverso do Quadrado da Distância, Krigagem do ArcGis e Krigagem do Spring para as amostras dissociadas do conjunto amostral 'GH2', com intuito de evidenciar o comportamento dos estimadores para um número menor de amostras.

ID	GH _{Real}	GH _{IQD-ArcGis}	GH _{Krig-ArcGis}	GH _{Krig-Spring}	Erro _{IQD-ArcGis}	Erro _{Krig-ArcGis}	Erro _{Krig-Spring}
1	1,6	5,55	4,78	5,53	71,16	66,53	71,05
2	3,02	4,60	4,70	4,21	34,34	35,72	28,22
3	1,4	6,64	6,30	6,36	78,92	77,77	77,99
4	1,77	3,08	2,73	3,09	42,54	35,07	42,72
5	5,33	1,58	1,30	2,34	237,62	311,44	128,07
6	2,71	2,43	1,90	5,15	11,58	42,93	47,34
7	1,78	2,31	1,35	2,66	22,94	31,97	33,09
Erro Médio:					71,30	85,92	61,21

(GH = Gradiente Hidráulico; IQD = Inverso do Quadrado da Distância; Krig. = Krigagem)

Os resultados para o conjunto menor de amostras apontam que a krigagem executada no Spring apresentou o menor erro médio (61,21%), seguida pelo método IQD (71,30%), enquanto a krigagem executada no ArcGis apresentou o maior erro médio (85,92%). A síntese dos erros médios para 'GH1' e 'GH2' é apresentada na Figura 4.

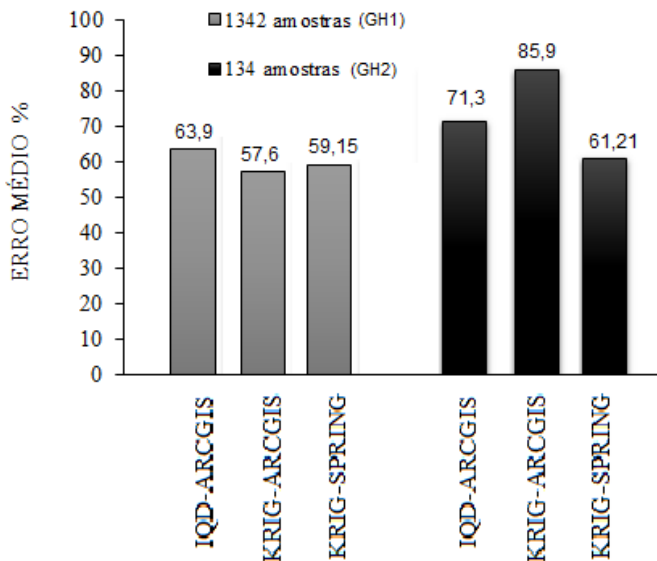


Figura 4 – Relação entre erro das interpolações do gradiente hidráulico (GH) por IQD e por krigagem com diferentes números de amostras. O comportamento do erro médio evidencia que a krigagem proferida através do *software* ArcGIS demonstrou melhor desempenho para um alto número de amostras (GH1), enquanto para o cenário contrário, isto é, com um baixo nº de amostras (GH2) o erro médio foi o mais proeminente.

A maior flutuação do erro médio (28,3%) entre as estimativas espaciais do ‘GH1’ e ‘GH2’ corresponde a krigagem realizada no *software* ArcGIS. Em contrapartida, a menor flutuação (2,06%) entre estes diferentes universos amostrais é associada à krigagem realizada no Spring. Sendo assim, a flutuação intermediária do erro médio (7,4%) foi a do método IQD. Ou seja, no quadro geral a interpolação por krigagem Spring se mostra a opção com menor erro médio em distintos universos amostrais, portanto, é uma opção de rotina adequada para ambos cenários. Todavia, caso o universo de amostras seja maior, o menor erro médio tende a ser por krigagem no ArcGIS. Neste momento, vale ressaltar que a krigagem a partir da plataforma Spring apresenta uma estimativa espacial superior à do ArcGIS quando se dispõem de um universo amostral reduzido.

Comparação para Diferentes Grupos Quantitativos de Amostras

O primeiro resultado apresentado na Figura 5 exhibe a interpolação para as amostras de ‘GH1’, na qual se visualiza uma correspondência para as diferentes estimativas espaciais. Entretanto, é notória uma maior suavidade e continuidade da estimativa espacial realizada pelo interpolador geoestatístico, o que já revela uma maior qualidade e uniformidade do dado.

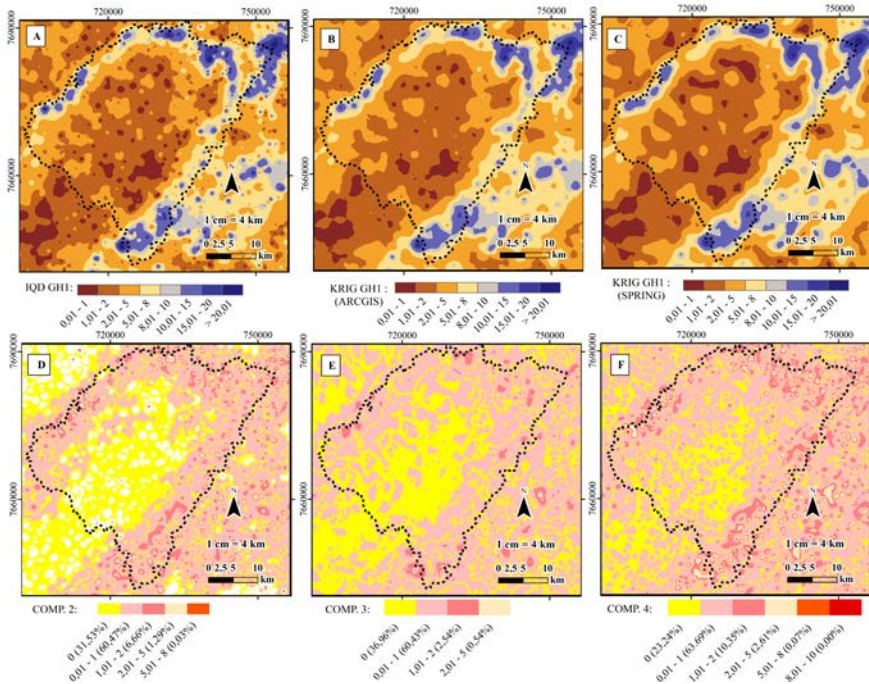


Figura 5 – Estimativas espaciais oriundas de diferentes métodos e mapas comparativos para o conjunto amostral ‘GH1’. a) interpolação por IQD; b) interpolação por Krigagem no *software* ArcGIS; c) krigagem realizada no *software* Spring; d) carta comparativa 2 denotando a correlação entre IQD e krigagem do ArcGIS; e) carta comparativa 3 derivadas da correlação entre krigagem do ArcGIS com a Krigagem do Spring; f) carta comparativa 4 representando a correlação entre o IQD e a krigagem executada no Spring.

A Figura 6 apresenta as estimativas espaciais do conjunto amostral ‘GH2’, na qual observa-se com uma dispersão mais suave e contínua na interpolação proferida pelo método IQD e pela krigagem no Spring. A krigagem realizada no ArcGIS propiciou uma dispersão das classes de forma retangular destoando do comportamento das demais interpolações (Figura 6B).

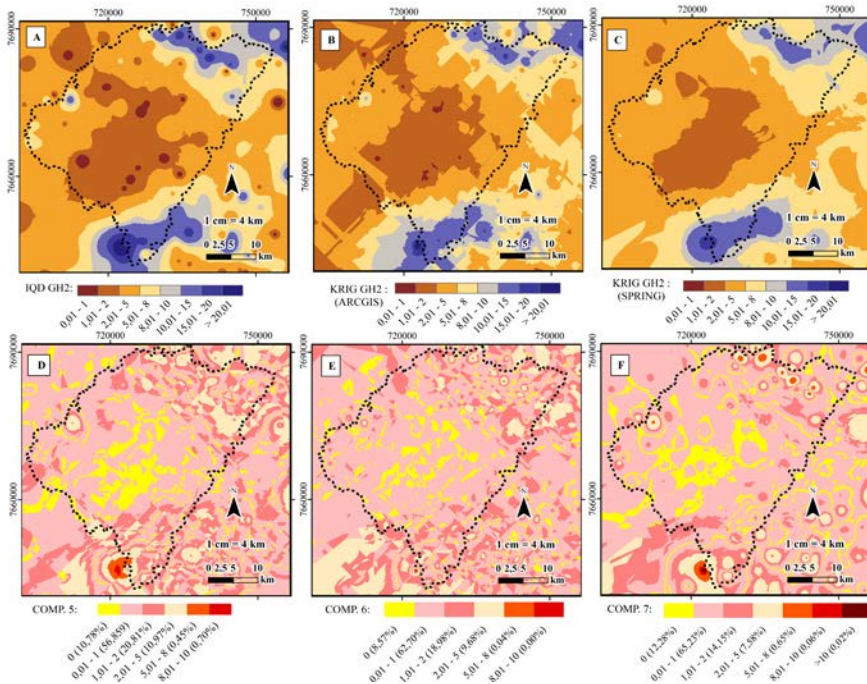


Figura 6 – Estimativas espaciais oriundas de diferentes métodos e mapas comparativos para o conjunto amostral ‘GH2’. a) interpolação por IQD; b) interpolação por krigagem no *software* ArcGis; c) krigagem realizada no *software* Spring; d) carta comparativa 5 denotando a correlação entre IQD e krigagem do ArcGis; e) carta comparativa 6 derivadas da correlação entre krigagem do ArcGis com a krigagem do Spring; f) carta comparativa 7 representando a correlação entre o IQD e a krigagem executada no Spring.

Na Figura 7 tem-se a síntese de todas as comparações realizadas para ‘GH1’ e GH2’. Analisando as comparações realizadas é possível identificar a melhor correlação para ‘GH1’ entre a krigagem do ArcGIS com a krigagem do Spring, na qual se verificou uma correspondência de cerca de 37% (Figuras 6E e 7B). A comparação entre a krigagem do ArcGIS com o método IQD, por sua vez, apresentou uma correlação de aproximadamente 32% (Figuras 6D e 7A). A menor correspondência dos estimadores espaciais para o universo amostral maior se deu na comparação da krigagem do Spring com o IQD, com uma correlação de apenas 23% (Figuras 6F e 7C).

Ressalta-se, assim, que ambos métodos apresentaram alta correlação para ‘GH1’, sabendo que a krigagem do ArcGIS, assim como a realizada no Spring, apresentam menores erros médios, conforme averiguado no tópico anterior, pode-se concluir que ambos procedimentos, além de propiciar uma interpolação mais suave e contínua, possuem significativa correspondência, uma vez que, ao desconsiderar variação mínima (0,1-1), ter-se-ia uma correspondência de aproximadamente 97% (Figura 7B).

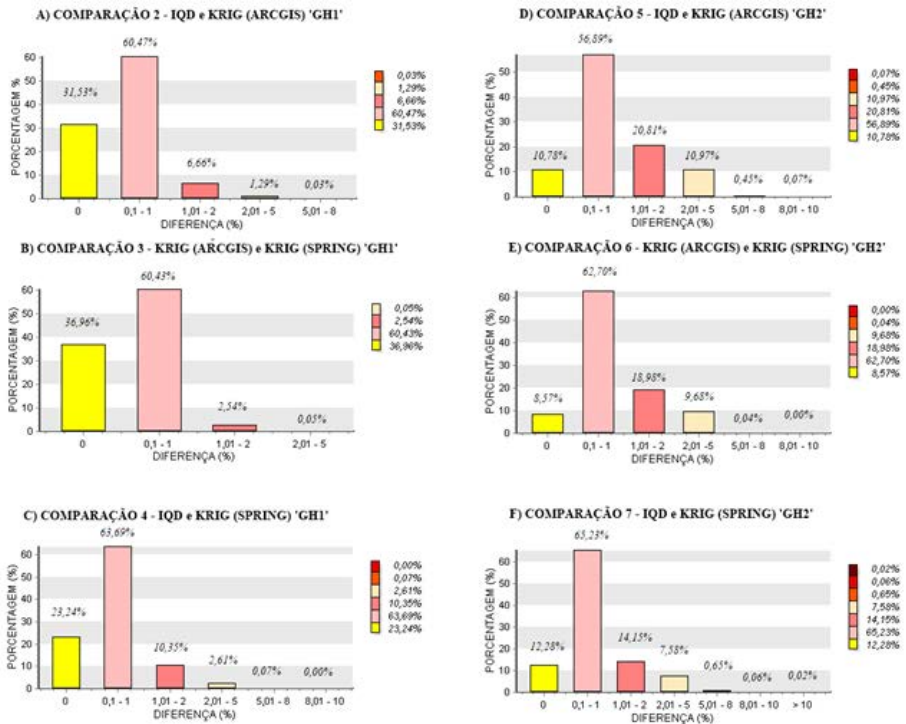


Figura 7 – Síntese das comparações empreendidas para diferentes universos amostrais ‘GH1’ e ‘GH2’, no qual é possível sublinhar como tendência geral a ampliação das diferenças entre os interpoladores para o cenário com menor universo amostral.

No conjunto amostral menor ‘GH2’ se articularam as mesmas estratégias metodológicas para se identificar a correlação entre as estimativas espaciais. Constatou-se que a maior correspondência se estabeleceu entre a krigagem realizada no Spring com a interpolação pelo IQD, apresentando uma correlação de aproximadamente 12%; se desconsiderarmos o intervalo de variação entre 0,1-1 a correlação aumenta para 65% (Figuras 6F e 7F). A correspondência da krigagem do ArcGis com o método IQD foi de aproximadamente 11%, entretanto, se desconsiderarmos o intervalo de variação entre 0,1-1 a correlação aumenta para 68% (Figuras 6D e 7D). A menor correlação foi a da krigagem do ArcGis com a krigagem do Spring, que resultou em uma correspondência de apenas 8,5%, contudo, se desconsiderarmos o intervalo de variação entre 0,1-1 a correlação aumenta para 77% (Figuras 6E e 7E). Logo, observamos que se considerarmos como insignificante uma variação menor que um, a maior correlação passa a ser da krigagem do Spring e ArcGis, com aproximadamente 77% de correspondência.

Cabe registrar que a krigagem do ArcGis apresenta o melhor ajustamento e menor erro somente quando se dispõe de um universo amostral maior, não mantendo tal comportamento em um cenário com poucas amostras. Sublinha-se que a krigagem em

ambiente Spring demonstrou ser mais adequada para ambos universos amostrais, apresentando menor variação em termos comparativos para os demais interpoladores, além de apresentar uma alternância do erro médio de apenas 2,06%.

Ao analisar a correlação da interpolação determinística do IQD se pode apresentar algumas conclusões. Conforme se apresenta na Figura 7, quando disposto para o conjunto amostral 'GH1' se pode tem uma correspondência do IQD de cerca de 23% para krigagem realizada no Spring e 32% para krigagem do ArcGis. O corrente padrão identificado para IQD para o conjunto amostral 'GH1' nos demonstra que mesmo apresentando visualmente uma qualidade inferior, em termos de suavidade em comparação aos demais interpoladores geostatísticos, o método do IQD apresentou uma significativa correspondência e um baixo erro para um conjunto amostral maior. Além disso, vale destacar que o método congrega uma maior simplicidade em sua manipulação, sendo pouco moroso em comparação aos demais interpoladores geostatísticos. Em contrapartida a avaliação da correlação do IQD para o conjunto amostral menor 'GH2' exibe uma redução significativa da correlação entre os interpoladores e aumento das flutuações.

Desse modo, é possível concluir em termos gerais que há uma elevação da incoerência e ampliação da variação dos valores interpolados entre a interpolação pelo IQD e krigagem quando se dispõe de um número menor de amostras.

Conclusões

A comparação das estimativas espaciais por IQD para o gradiente hidráulico obtido do MDE SRTM e IBGE demonstrou em termos regionais uma boa correspondência visual, contudo, a correlação percentual destas estimativas foi de apenas 7,02%, configurando uma baixa correlação. Desse modo, a incorporação da drenagem derivada do MDE SRTM em iniciativas que se voltem à apreensão das características físico-ambientais tendo como propósito uma análise mais detalhada desses atributos incorre em maiores erros e imprecisões.

Os dados permitem concluir que em ambos os *softwares* ocorre um aumento do erro médio para um grupo quantitativo de amostras com menos dados, contudo o erro é mais pronunciado na krigagem do *software* ArcGis, apresentando um aumento do erro médio de quase 30%, enquanto para um universo amostral menor o erro médio da krigagem no Spring aumentou apenas 2%, enquanto para o IQD o aumento do erro médio foi de 7,4% em um cenário de poucas amostras. Diante do exposto, o *software* Spring apresenta-se mais adequado para interpolações, não tendo um comprometimento acentuado da qualidade da interpolação conforme o universo amostral disponível. Em síntese, identificou-se uma alta correlação para os diferentes métodos de interpolação para o cenário com um universo amostral maior, tendo um progressivo aumento do erro médio com a diminuição das amostras.

Quanto às demais comparações realizadas foi possível evidenciar uma correspondência de 32% para IQD e krigagem do ArcGis para um universo amostral maior, decaindo para 11% para um universo amostral menor. A interpolação espacial por krigagem no ArcGis e no Spring tem uma correlação de 37% para muitas amostras e declina para 9% para poucas amostras. Por fim, a IQD e krigagem no Spring possuem uma equivalência

de 23% para muitas amostras, que se reduz para 12% em um cenário com poucas amostras. Portanto, observa-se uma significativa redução da correlação com a diminuição do universo amostral em todos cenários analisados. Logo, recomenda-se que se tenha uma compreensão ampla da variável a ser interpolada e dos objetivos do trabalho para se discernir qual interpolador se mostra mais adequado, tendo em mente as imprecisões acarretadas pela alteração do número de amostras.

Por fim, destaca a importância de se analisar outras diferentes variáveis com comportamentos distintos, inclusive anisotrópicas para avançar na compreensão dos destaques apontados neste trabalho. Nesse sentido, este trabalho apresenta o *software* Spring como o mais adequado para interpolações geoestatísticas independente do universo amostral. O *software* ArcGis apresentou o melhor resultado apenas para o grupo quantitativo com um maior número de amostras, e, respectivamente, o pior resultado para o universo amostral menor. Infere-se que a superioridade identificada no Spring esteja relacionada a maior suavidade do produto final, qualidade da lógica de interpolação desenvolvida no programa e autonomia que o mesmo confere ao usuário na execução dos procedimentos.

Referências Bibliográficas

BARROS, R. S.; CRUZ, C. B. M. Avaliação da altimetria do modelo digital de elevação do SRTM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIII, *Anais*. Florianópolis: INPE, 2007. p. 1243-1250

BURROUGH, P. A. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford: Clarendon Press, 1986.

DIRKS, K. N.; HAY, J. E.; STOW, C. D.; HARRIS, D. High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: Interpolation of rainfall data. *Journal Hydrology*, n. 208, p.187-193, 1998.

ESRI. *Using ArcGIS Geostatistical Analyst – GIS by ESRI*. Redlands, CA: ESRI, 2001.

JACOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, XV, *Anais*. Caxambu, MG: ABEP, 22p, 2006. Disponível em: <http://www.abep.org.br/publicacoes/index.php/anais/article/view/1530/1494>. Acesso em: 24 fev. 2022.

LANDIM, P. M. B. *Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas*. Rio Claro: UNESP/Lab. Geomatemática DGA, IGCE. Texto Didático 02, 20p., 2000.

LANDIM P. M. B. Sobre Geoestatística e mapas. *Terræ Didática*, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

Felipe Pacheco Silva

MELLO, C. R.; FERREIRA, D. F.; SILVA, A. M.; LIMA, J. M. Análise de modelos matemáticos aplicados ao estudo de chuvas intensas. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, n. 25, p. 693-698, 2001.

_____; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 27, p. 925-933, 2003.

RODRIGUEZ, S. K. *Neotectônica e sedimentação quaternária na região da "Volta Grande" do Rio Xingu, Altamira, PA*. 1993. 124f. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) – Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Strahler, A.N. Dynamic Basis of Geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, v. 63, n. 9, p. 923-938, 1952.

TOBLER, W. Smooth Pycnophylactic Interpolation for Geographical Regions. *Journal of the American Statistical Association*, v. 74, n. 367, p. 519-536, 1979.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), ao Prof. Rafael Silva de Barros do Laboratório Espaço da UFRJ pelo estímulo ao presente trabalho, no âmbito da disciplina Representação e Análise de Dados Espaciais, ao geógrafo do Estado do Paraná André Fialho Eiterer pela leitura do trabalho, à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela concessão da Bolsa Doutorado Nota 10 (Nº do processo E-26/200.661/2021) que permitiram a elaboração desta pesquisa.

Recebido em: 26/05/2022 Aceito em: 06/06/2022