

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS

FRANCISCO CARLOS MOREIRA GOMES

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO EM
MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO**

JUIZ DE FORA

2021

FRANCISCO CARLOS MOREIRA GOMES

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO EM
MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Juiz de Fora, área de concentração: Dinâmicas Socioambientais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Dr. Ricardo Tavares Zaidan

JUIZ DE FORA

2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Carlos Moreira Gomes, Francisco.

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO / Francisco Carlos

Moreira Gomes. -- 2021.

173 f. : il.

Orientador: Ricardo Tavares Zaidan

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2021.

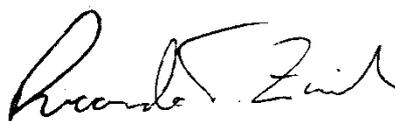
1. Geoestatística. 2. Geoprocessamento. 3. Análise espacial. 4. Geografia. I. Tavares Zaidan, Ricardo, orient. II. Título.

FRANCISCO CARLOS MOREIRA GOMES

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO EM
MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geografia.

Dissertação defendida e aprovada em 26 de fevereiro de 2021.



Prof. Dr. Ricardo Tavares Zaidan
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. César Henrique Barra Rocha
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. Paulo Márcio Leal de Menezes
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dedico esse trabalho a todos aqueles que de alguma forma me acompanharam nesta caminhada, compartilhando as alegrias, tristezas e frustrações da vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Sempre gostei de escrever agradecimentos em trabalhos acadêmicos, pois é neste momento que podemos ser nós mesmos. Admito neste momento, que não serão palavras curtas como é de praxe pois “se vi mais longe foi porque estive sobre o ombro de *muitos* gigantes”, mas peço perdão também, porquê digamos que o tato com as palavras não é bem a minha especialidade.

De toda forma acredito que não preciso me preocupar com a forma como escrevo aqui, porque é bem capaz se algum colega acadêmico pegar minha dissertação daqui a alguns anos, nem chegue a ler essas palavras iniciais. Todavia, se um desventurado acabar caindo aqui por acaso, peço que leia essas palavras como uma carta que descreve as memórias de jovem acadêmico entendendo que ao escutamos uma pessoa falar de alguém, aprendemos muito mais daquele que fala do que da personagem da história em si.

Quando chego ao final de uma etapa, sempre gosto de voltar os meus olhos ao começo para ver o quanto eu já caminhei. E ao fazer isso nesse momento, sempre retorno ao mesmo lugar, quando a professora Marcia Maria no primeiro ano do ensino médio me chamou para fazer PISM na UFJF. Hoje olhando para o começo, vejo que de fato tenho muito a agradecer ao esforço da professora que acreditou que eu poderia ir além. E ainda hoje ela continua plantando sementes, pois enquanto escrevo esses agradecimentos acabei de ver uma postagem sua no *facebook*, convidando alunos para o PISM, oferecendo a outros alunos a mesma oportunidade que ofereceu a mim.

Dentre os diversos colegas e amigos que me acompanharam nesta jornada, não posso deixar de citar alguns, pois como não falar da Nicolle, que sempre me arrastava para tomar umas “*limonadas*” no Rise as quintas a noite e já teve dias que quase fomos parar em São Paulo na tentativa de voltar para o São Pedro (hahahah). E como poderia citar o Rise e não falar do Romário que todo mundo conhece e das conversas frívolas, sérias, alegres e tristes que tivemos. Da mesma forma que não é possível falar do Romário sem pensar na Rebeka, com aquela risada estranha (ahhahah) e das conversas filosóficas ou sem sentido a qualquer hora.

E se formos falar de risadas marcantes, por que não neste momento falar do Flávio? Que do escadão do ICH a gente consegue ouvir meu grande amigo rindo no LATUR, que nunca me abandonou frente aos tropeços que tive na faculdade. Ao tocar no tema lealdade, não tem como não lembrar do Betinho, que foi capaz de viver comigo o meu pior momento da faculdade quando ainda dividíamos o apartamento pois sabia que eu precisava alguém ali àquela hora. E sobre pessoas que vieram e ficaram, lembro da Michela que sempre de cara fechada, e no

começo acho que nem gostava muito de mim, mas depois de tanto tempo de implicância e fazê-la passa vergonha em público, acabou deixando de resistir aceitando me aturar (hahah).

E falando em pessoas implicantes e brincalhonas, só consigo lembrar do LGA com a galera sem grana para ter filho (hahaha). Quando o Robson estava lá, não tinha como não passar o dia inteiro rindo daquele cara, seja pelas piadas icônicas, apelidos que criava ou quando ele não fazia nada e mesmo assim a culpa caía em cima dele (hahaha). Mas acima de tudo, o Robson me ensinou companheirismo e profissionalismo e sem falar claro, que foi graças a ele que me propus a estudar a temática desta dissertação, já que como ele dizia: “ALÃOS MELHOR QUE LIDAR”.

E me propor lembrar de Robsão sem lembrar do Romulo é uma heresia, ainda mais porque foi graças a mim que esse cara começou a fazer uns mapas bonitos, né mano? Porque antes, você não vai admitir, eram tristes seus *mapinhas*. Salvo as brincadeiras, talvez seja o Romulo a pessoa com quem mais aprendi dentro do laboratório no dia a dia, compartilhando conhecimento, amizades e porque não os ranços do ambiente acadêmico.

Não posso finalizar o LGA sem falar ainda do Gugu, o mais bonito de nós, que nunca tinha tempo ruim para fazer qualquer coisa, ou ainda do Luciano e da Carol já que: “*aquilo que o show da Anita juntou, ninguém separa*” (hahaha). E o que falar do Pinheiro? Só posso dizer que chegava quieto fazia suas paradas e sumia, menos quando tinha do jogo do Botafogo aí ele nem piscava. Opa! pera que não posso me esquecer ainda dos agregados ao laboratório, pois tínhamos o Rafael, menino de são judas, que ia lá fazia barulho, contava umas barbaridades e depois sumia só voltava mês que vem de novo e a Angel que estava lá sempre visitando o laboratório e participando da balbúrdia.

Antes do fim, reservo dois ou três parágrafos para agradecer aos professores da UFJF que de alguma forma direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho. Não poderia deixar para depois o meu agradecimento a Adriana, pois foi no dia a dia em suas aulas que me educou pelo exemplo, demonstrando que sendo disciplinado, trabalhando duro e acima de tudo amando o que faz, é uma receita perfeita para se realizar profissionalmente e inspirar outros jovens profissionais que estão entrando na área.

Se tratando de professoras, não posso deixar de sobra a Maria Lucia, que sempre está disposta a conversar com a gente e nos aconselhar sobre os desafios e frustrações da vida acadêmica. Todos bem sabemos que o caminho da pós graduação é de veras solitário e muitas vezes hostil, mas sempre soube que se precisasse conversar com alguém, a Maria Lucia estaria lá. Por falar em pessoas que sempre estão lá, um agradecimento ao Wagner se torna mais que justo! Seja pelas conversas no gabinete de assuntos frívolos, outrora mais complexos sobre a

história do pensamento geográfico ou simplesmente para pedir livros emprestados que eu achei que nem existiam mais, esteve disposto a me ajudar em todo o momento. E claro, foi capaz de me ensinar que o fato da Geografia dele ser diferente da minha, não é motivo para ele afirmar que aquilo que faço deixa de ser Geografia.

Ainda não posso deixar de falar do professor Cezar, que ao longo da graduação e no mestrado, me acompanhou de perto e contribuiu de forma ativa na minha formação, sempre disposto a fazer o que fosse necessário para o desenvolvimento dos meus projetos, sendo ele o engenheiro mais geógrafo que conheço. Reservo ainda umas poucas palavras ao professor Fábio, que não tem muito tempo de casa, mas em pouco tempo sempre se mostrou cordial e solícito a todos os anseios de uma nova geração de geógrafos que vejo surgir e acredito que faço parte, inclusive sempre quando agarro e alguma estatística vou ao meu guru.

É de praxe ainda promover agradecimentos ao orientador, contudo sabemos que nem sempre essa é uma relação harmoniosa dentro da academia. Diante de tal realidade, me considero um privilegiado pois fui capaz de construir uma relação prospera de trabalho com o professor Zaidan. Mas principalmente o agradeço pela liberdade que me ofereceu na condução desta pesquisa e ao longo de todo o mestrado, algo com que nem os orientados sabe lidar bem, mas que acabou me possibilitando experimentar um processo de formação que criou um pesquisador autônomo e plenamente ser capaz de buscar respostas, ousando nas soluções dos problemas encontrados sempre que possível. Muito obrigado!

Por fim reservo minhas últimas palavras para agradecer a minha família, confesso que sempre achei bem clichê os agradecimentos aos familiares em trabalhos acadêmicos, contudo ao longo das dores e alegrias do mestrado percebi a importância de ter um lugar seguro para repousar quando as pernas falharem e o constante sentimento de incapacidade se abater.

A maioria talvez não saiba, mas meus pais não tiveram muito acesso à formação escolar e acadêmica, e por conta disso muitas vezes eles acabam não compreendendo a fonte das minhas dores e frustrações. Contudo, mesmo que não consigam entender os meus motivos os vejo sempre dispostos a me fazer, pelo menos no final de semana que vou para casa, **muito feliz**. Não esqueço do meu pai, sempre me falando para ter calma que as coisas vão dar certo, ou da minha mãe me mandando mensagens aleatórias dizendo que me ama. Curiosamente, muitas dessas mensagens chegavam nos momentos mais desafiadores e me faziam lembrar o porquê ter que me esforçar tanto, talvez fosse o sexto sentido de mãe apitando (rs).

Ainda se tratando de família, não posso deixar de falar da minha irmã sempre inconveniente, chata, me constrangendo nas redes sociais. Resumindo, ela sempre esteve lá. Quando eu preciso chorar. Reclamar da vida. Ou apenas conversar com alguém que entende

como a nossa família complicada funciona ela sempre esteve lá. E falar da minha irmã é impossível sem lembrar dos meus sobrinhos. Davi que nem falava quando vim para a UFJF e hoje me liga para contar sobre a vida dele e mostrar os mapas que ele faz me surpreender, ou de Diana que mal chegou ao mundo, com um aninho apenas, e não sabe bem o que está fazendo aqui, no entanto suas fotos caindo, andando e babando me fazem sorrir sempre.

Me arisco agora a estar sendo demasiado alongado nestes agradecimentos, mas ao falar de família gostaria de falar daqueles que se tornaram também a minha família postiça. Como não agradecer ao Lobato, Monique e as meninas que sempre tiveram um carinho especial por mim. O Lobato chegou como um professor substituto, foi embora como um amigo, mas hoje o considero um dos membros mais estimados da minha família.

Cabe ainda agradecer a sociedade brasileira, a qual por meio da Universidade Federal de Juiz de Fora, me financiou ao longo de parte da pesquisa. Reforçando assim o eterno compromisso da UFJF em desenvolver conhecimento público e de qualidade para o país. Sei que vou levar comigo um enorme carinho pela UFJF, por ter me acompanhado ao longo da graduação e mestrado, sendo os conhecimentos e relações que criei em seus corredores pilares da história de vida daqui para frente. *Lymina Spargere!!!*

No mais finalizo aqui meus agradecimentos pedindo perdão, a todos aqueles que não pude deixar registrado os nomes ou as histórias escritas nestes agradecimentos, mas que os guardo nas memórias e lembranças de cada momento compartilhado, decepções e alegrias vividas ao longo destes anos de Geografia e UFJF.

*Se eu vi mais longe, foi por estar sobre os ombros de **muitos*** gigantes.*

Isaac Newton (1642 – 1727)

*Grifo nosso

RESUMO

Os modelos digitais de elevação (MDE), são os subsídios básicos para promover diversas análises ambientais ou socioespaciais. Contudo, a qualidade desses modelos tridimensionais do terreno está intimamente ligada à sua resolução espacial, de maneira que quanto maior a resolução espacial, melhor a capacidade destes produtos em representar as formas na superfície do corpo imageado. No entanto, os produtos de melhor resolução espacial, possuem um custo de aquisição oneroso, de maneira que nem sempre o poder público dispõe de recursos para sua aquisição seja no planejamento urbano/regional ou para pesquisas acadêmicas. Tal realidade faz com que normalmente sejam empregados MDE com menor resolução espacial, mas que são disponibilizados gratuitamente. Sendo que atualmente, começam a surgir MDE com melhores resoluções espaciais e 100% gratuitos, como os produtos provenientes do ALOS-PALSAR, que entrega um MDE com 12,5m de resolução espacial. Um dos MDE gratuitos predecessores do ALOS-PALSAR foram os MDE-SRTM, que inicialmente eram distribuídos com uma resolução espacial de 90m, mas Valeriano (2008; 2010; 2010a), após uma série de processos de refinamento por meio da geoestatística, foi capaz de gerar novos produtos com 30m de resolução espacial. Neste sentido surge o questionamento da possibilidade de aplicar processos metodológicos semelhantes nos MDE do ALOS-PALSAR, a fim de obter produtos com uma resolução espacial maior que 12,5m. Assim o objetivo geral desta pesquisa foi promover uma análise comparativa de diversos métodos de interpolação, alterando a resolução espacial dos MDE do ALOS-PALSAR para as escalas espaciais de 10m, 8m e 6m. Com o intuito de observar, tanto qualitativamente como estatisticamente, as potencialidades e perdas durante esse processo, usando como base de parâmetro de comparação um MDE gerado com LIDAR de 1m de resolução espacial. Como resultados gerais, no que se refere as análises estatísticas, foram aplicados os testes de Coeficiente da Correlação de Pearson (r), Coeficiente de Determinação, Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Médio Quadrático (EMQ) e Raiz do Erro Quadrático Médio (REMQ). A fim de promover uma análise mais completa inda foi realidade uma a verificação qualitativa dos MDE, onde foram geradas cartas de declividade e hipsometria dos MDE re-interpolados do ALOS-PALSAR em comparação com cartas geradas do LIDAR e perfis de relevos com o objetivo central de verificar o comportamento do efeito dossel nos MDE re-interpolados e a influência disso na capacidade de representar as geometrias das formas do relevo. E ao final do estudo foi possível concluir pela análise estatística em conjunto com a avaliação qualitativa, que não ocorre ganhos reais com o processo de interpolação para resoluções espaciais com maior detalhe, independentemente do método de interpolação usado,

já que é impossível criar informação do nada. Neste sentido, por mais que se reduza o tamanho dos pixels para gerar os novos MDE, através da aplicação de interpoladores, a fonte original será de dados com uma resolução espacial de 12,5m. E mesmo que não haja ganhos, é possível mensurar as perdas que ocorrem ao longo do processo de aumento da resolução espacial, ajudando os pesquisadores a optar pelas técnicas que gerem MDE com os menores erros possíveis, de acordo com o objetivo de emprego destes MDE. Se o objetivo for usar os MDE do ALOS-PALSAR re-interpolados para análise de inundações, alagamentos ou enchentes, devido à baixa capacidade dos MDE re-interpolados em modelar áreas de planície, que são onde se concentram esses eventos, os trabalhos resultarão estudos sujeitos a uma incerteza maior em seus resultados. Por outro lado, se o foco dos estudos forem escorregamentos, os MDE se mostraram melhor em representar superfícies declivosas onde se concentram a ocorrência destes eventos, porém a escolha de um interpolador que subestime menos as áreas de maior declividade se mostra necessário a fim de melhorar seus resultados. Desta forma caso o pesquisador opte por usar destas técnicas na geração de um MDE de melhor resolução, é preciso que tenha a plena consciência do aumento do grau de incerteza das informações que está gerando, a fim de ter ciência se esses erros são admissíveis nos resultados finais de sua pesquisa.

Palavras chave: Geoestatística, ALOS-PALSAR, Geoprocessamento, Geografia, MDE

ABSTRACT

Digital elevation models (DEM) are the basic elements for the development of environmental or socio-spatial analyses. But the quality of these tridimensional models of the terrain is intimately related to its spatial resolution, in such way that the better the spatial resolution, the better the capability to represent the shapes in the surface of the imaged body. However, the products of better spatial resolution have high acquisition costs, in such way that the State does not always have the resources needed for their acquisition, be it on the sphere of urban/regional planning or for academic research. This scenario results in the usual use of lower spatial resolution DEM which are made available for free. Currently, DEM with better spatial resolution and 100% free are emerging, such as the products from ALOS-PALSAR, which delivers DEM with spatial resolution of 12.5m. One of the free ALOS-PALSAR DEM predecessors was the SRTM DEM, which was initially distributed with a spatial resolution of 90m, but Valeriano (2008; 2010; 2010a), after a series of refinement processes performed by means of geostatistics, was able to generate new products with spatial resolution of 30m. In this regard arises the question about the possibility of application of similar methodological processes on the ALOS-PALSAR DEM, in order to obtain products with spatial resolution higher than 12.5m. In this manner, the general aim of this research was to do a comparative analysis of several interpolation methods, by changing the spatial resolution of the ALOS-PALSAR DEM to the spatial scales of 10m, 8m and 6m. In order to observe, qualitatively and statistically, the potentialities and losses during this process, the comparison parameter used was a DEM generated with LiDAR of spatial resolution of 1m. As general results, regarding the statistical analyses, the tests applied were the Pearson's Coefficient Correlation (r), Coefficient of Determination, Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE) and Root Mean Square Error (RMSE). A qualitative verification of the DEM was performed in order to do an analysis still more complete, where declivity and hypsometric maps were generated from the reinterpolated ALOS-PALSAR DEM in comparison with maps generated from LiDAR and terrain profiles with the central purpose of verification of the behavior of the dossel effect in the reinterpolated DEM and its influence in the capability of representation of the geometry of the terrain. At the end of the research, it was possible to conclude, from the statistical analysis and the qualitative assessment, that there are no significant enhancements with the process of interpolation for more detailed spatial resolutions, regardless of the interpolation method chosen, since it is impossible to create information out of nowhere. In this regard, much as the pixels size are reduced to generate the new DEM, through application of

interpolation methods, the original source is made of data with spatial resolution of 12,5m. And even if there is no improvement, it is possible to measure the losses that occur throughout the process of enhancement of spatial resolution, which may aid researchers choose techniques that generate DEM with the smallest possible error, according to the use of these DEM. If the aim is to use the reinterpolated ALOS-PALSAR DEM for flood or inundation analysis, due to the low capability of reinterpolated DEM to model lowland areas, which are where these events take place, the studies will be prone to result in greater uncertainty. By contrast, if the aim of the studies is landslides, DEM has shown better results in representing steep surfaces where the occurrence of these events is concentrated. However, the choice of an interpolation method that underestimates less areas of higher declivity is necessary to improve the results. In this manner, should the researcher opt to use these techniques in the generation of a higher resolution DEM, it is necessary to be aware that the degree of uncertainty of the generated information will increase in order to know whether the errors are admissible in the final results of the research.

Keywords: Geostatistics, ALOS-PALSAR, GIS, Geography, DEM

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo de como as teorias e modelos trabalham em explicar o real	39
Figura 2 - Esquema representativo de como as lacunas entre dois modelos que explicam uma teoria, podem ser ocupados por outro modelo menor.	39
Figura 3 - Esquema teórico da comparação dos modelos como uma lente, ora mais próxima da realidade (modelos concretos) outrora mais distantes (modelos teóricos)	40
Figura 4 - Síntese da tipologia e classificação dos modelos científicos e não científicos.....	42
Figura 5 - Esquema simplificado da diferença conceitual entre MDT, MDS e MDE	51
Figura 6 – Esquema teórico simplificado da forma como o processo de interpolação por IDW, determina o raio de influência do ponto central	57
Figura 7 - Esquema teórico simplificado de como o processo de interpolação por Spline funciona, demonstrando a diferença entre as superfícies modeladas por Spline tensionado e por Spline regularizado	58
Figura 8 - Esquema simplificado da geração de diagrama de Voronoy a partir da triangulação de Delaunay. Ambas utilizadas na técnica de interpolação por meio de Vizinho Natural.....	60
Figura 9 - Mapa de John Snow do surto de cólera da Golden Square em 1854.....	62
Figura 10 - Mapa de Localização da Área de estudo	72
Figura 11 - Localização das áreas pré-selecionadas para a execução dos perfis de relevo	90
Figura 12 - Localização dos perfis virtuais traçados para a comparação dos MDE.....	92
Figura 13 - Localização dos perfis reais medidos para a comparação dos MDE	94
Figura 14 - Localização das bases usadas no levantamento dos perfis reais traçados para a comparação dos MDE	95
Figura 15 - Esquema ilustrativo da diferença entre os diagramas gerados por pontos de valor conhecidos (linha cinza) e com todos os pontos de valor conhecidos ou não (linha preta) ...	102
Figura 16 - Declividade gerada por meio dos MDE gerados de acordo com cada método de interpolação a partir dos dados do ALOS-PALSAR com resolução espacial de 10m e do MDE base para a comparação gerado pelo LIDAR também com resolução espacial de 10m	108
Figura 17- Hipsometria gerada por meio dos MDE gerados de acordo com cada método de interpolação a partir dos dados do ALOS-PALSAR com resolução espacial de 10m e do MDE base para a comparação gerado pelo LIDAR também com resolução espacial de 10m	109
Figura 18 - Declividade gerada por meio dos MDE gerados de acordo com cada método de interpolação a partir dos dados do ALOS-PALSAR com resolução espacial de 08 m e do MDE base	116
Figura 19 - Hipsometria gerada por meio dos MDE gerados de acordo com cada método de interpolação a partir dos dados do ALOS-PALSAR com resolução espacial de 08me do MDE	117

Figura 20 - MDE gerados de acordo com cada método de interpolação a partir dos dados do ALOS-PALSAR com resolução espacial de 08 m e o MDE base para a comparação gerado pelo	124
Figura 21 - Hipsometria gerada por meio dos MDE gerados de acordo com cada método de interpolação a partir dos dados do ALOS-PALSAR com resolução espacial de 08 m e do MDE base	125
Figura 22 - Esquema representativo da variação percentual dos MDE do ALOS em relação ao LIDAR em cada um dos traçados dos perfis analisados	126
Figura 23 - Esquema ilustrativo da possível influência do “efeito dossel” na geração dos MDE com dados do ALOS-PALSAR.....	128
Figura 24 - Traçado referente ao PERFIL 2, demonstrando a superfície derivada dos dados do ALOS-PALSAR e LIDAR além da faixa de variação percentual de ambas.....	129
Figura 25 - Esquema ilustrativo da possível influência do posicionamento dos pontos amostrais entre uma área de linha de quebra, que gera uma suavização da superfície modelada no processo de interpolação.....	130
Figura 26 - Traçado referente ao PERFIL 3, demonstrando a superfície derivada dos dados do ALOS-PALSAR e LIDAR além da faixa de variação percentual de ambas.....	131
Figura 27 - Esquema representativo da variação percentual dos MDE do ALOS em relação aos perfis medidos em cada um dos traçados dos perfis reais analisados	133
Figura 28 - Traçado referente ao perfil ALPHA VILE, demonstrando a superfície derivada dos dados do ALOS-PALSAR e dados levantados em campo além da faixa de variação percentual de ambas.	134
Figura 29 - Traçado referente ao perfil BR 440, demonstrando a superfície derivada dos dados do ALOS-PALSAR e dados levantados em campo além da faixa de variação percentual de ambas.....	135
Figura 30 - Traçado referente ao perfil PASTO, demonstrando a superfície derivada dos dados do ALOS-PALSAR e dados levantados em campo além da faixa de variação percentual de ambas.....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipologia dos modelos de métodos de interpolação, suas características e funções aplicadas.	54
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Índices estatísticos resultado da comparação dos MDE gerados por cada método de interpolação nos dados do ALOS-PALSAR em relação ao LIDAR. Ambos na resolução espacial de 10m	100
Quadro 2 - Valores máximos de declividade encontrados em cada MDE de acordo com método de interpolação aplicado nos dados do ALOS-PALSAR, e o índice de similaridade das imagens (SSIM) gerado pela declividade e hipsometria frente as geradas pelo LIDAR, Ambos em resolução espacial de 10m	104
Quadro 3 - Índices estatísticos resultantes da comparação dos MDE gerados por cada método de interpolação nos dados do ALOS-PALSAR em relação ao LIDAR, ambos na resolução espacial de 8 m	111
Quadro 4 - Valores máximos de declividade encontrados em cada MDE de acordo com método de interpolação aplicado nos dados do ALOS-PALSAR, e o índice de similaridade das imagens (SSIM) gerado pela declividade e hipsometria frente as geradas pelo LIDAR, Ambos em resolução espacial de 8 m.	113
Quadro 5 - Comparativo entre a diferença entre os valores máximos de declividade e termos absolutos em graus e relativos de porcentagens MDE com resolução de 8m	115
Quadro 6 - Índices estatísticos resultantes da comparação dos MDE gerados por cada método de interpolação nos dados do ALOS-PALSAR em relação ao LIDAR, ambos na resolução espacial de 6m	118
Quadro 7 - Valores máximos de declividade encontrados em cada MDE de acordo com método de interpolação aplicado nos dados do ALOS-PALSAR, e o índice de similaridade das imagens (SSIM) gerado pela declividade e hipsometria frente as geradas pelo LIDAR, Ambos em resolução espacial de 6 m.	121
Quadro 8 - Comparativo entre a diferença entre os valores máximos de declividade e termos absolutos em graus e relativos de porcentagens MDE com resolução de 6m	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AVNIR-2	Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2
CGIS	Canadian Geographic Information System
DEDT	Dados de Elevação Digital do Terreno
EISPACK	Matrix Eigensystem Package
EMA	Erro Médio Absoluto
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMQ	Erro Médio Quadrático
Esri	Environmental Systems Research Institute
FORTTRAN	FORmula TRANslation System
IDE	Integrated Development Environment
IDW	Inverso da Potência das Distâncias
ISAS	Instituto de Ciências Espaciais e Astronáuticas
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
LGA	Laboratório de Geoprocessamento Aplicado
LIDAR	Light Detection Ranging
LINPACK	Basic Linear Algebra Subprograms
MatLab	MATrix LABoratory
MDA	Modelo Digital de Altura
MDE/DEM	Modelos Digitais de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MTT	Modelos Tridimensionais do Terreno
NAGEA	Núcleo De Análise Geo Ambiental
NAL	Laboratório Aeroespacial Nacional do Japão
NASDA	Agência Nacional de Desenvolvimento Espacial do Japão
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PRISM	Panchromatic Remote-sensing Instrument Stereo Mapping
R	Coefficiente da Correlação de Pearson
REMQ	Raiz do Erro Quadrático Médio
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

SSIM	Structural Similarity
TIN	Triangulated Irregular Network
m	Metro e/ou metros
m²	Metros Quadrados
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	24
2.2	OBJETIVO GERAL.....	24
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3	ESTADO DA ARTE	25
3.1	ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA.....	25
3.2	OS MODELOS.....	35
3.3	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – SIG	60
3.4	A EVOLUÇÃO DOS ESTUDOS SOBRE MDE NO BRASIL	67
4	ÁREA DE ESTUDO	70
4.1	O RECORTE DE ESTUDO	71
5	MATERIAIS E MÉTODOS	74
5.1	MATERIAIS	74
5.2	MÉTODOS.....	79
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
6.1	OS RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ALTIMÉTRICA DOS MDE E SUBPRODUTOS COM RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 10M.	99
6.2	OS RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ALTIMÉTRICA DOS MDE E SUBPRODUTOS NA RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 8M.	110
6.3	OS RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ALTIMÉTRICA DOS MDE E SUBPRODUTOS NA RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 6M.	118
6.4	ANÁLISE DOS PERFIS DE RELEVO VIRTUAIS: CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FORMAS, TIPOS DE COBERTURAS E SUA INFLUÊNCIA NA REPRESENTAÇÃO DO RELEVO	126
6.5	ANÁLISE DOS PERFIS DE RELEVO REAIS: CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FORMAS, TIPOS DE COBERTURAS E SUA INFLUÊNCIA NA REPRESENTAÇÃO DO RELEVO	132
7	CONCLUSÕES	138
7.1	A LIMITAÇÃO INTRÍNSECA DOS MÉTODOS DE ABORDAGEM TRADICIONAL NA COMPARAÇÃO ENTRE MDE.	138

7.2 AS LIMITAÇÕES DOS RESULTADOS OBTITVOS NESTA ANÁLISE DE INTEPOLADORES E MDE	142
7.3 É VÁLIDO O PROCESSO DE INTERPOLAÇÃO PARA PROMOVER MELHORAS NA RESOLUÇÃO ESPACIAL DOS MDE?.....	143
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	146
REFERÊNCIAS	148
APÊNDICE A	156
APÊNDICE B.....	157
APÊNDICE C	158
APÊNDICE D	159
APÊNDICE E.....	160
APÊNDICE F.....	161
APÊNDICE G	162
APÊNDICE H.....	163
APÊNDICE I.....	164
APÊNDICE J	165
APÊNDICE K.....	166
APÊNDICE L.....	167
APÊNDICE M	168
APÊNDICE N	169
APÊNDICE O	170
APÊNDICE P.....	171
APÊNDICE Q	172
APÊNDICE R	173

1 INTRODUÇÃO

Ao realizar análises espaciais, seja com fins ambientais ou sociais, faz-se necessário ao pesquisador ter à disposição dados que representem, de alguma forma, o recorte espacial em estudo. Para tanto, os Modelos Tridimensionais do Terreno (MTT) consistem em um importante subsídio.

Atualmente, com o desenvolvimento e a incorporação das tecnologias da informação em diversos âmbitos da vida social, foi possível a automação de ferramentas para levantamentos cruciais à tais análises. Nesse sentido, ampliam-se os usos de equipamentos como estações totais, drones, sensores a laser e programas computadorizados. Dentre as inovações, ferramentas aeroespaciais como sensores de radares em satélite e aerotransportados têm se destacado, em razão de permitirem que seus dados sejam inseridos em *softwares* de geoprocessamento capazes de promover o tratamento, a manipulação e a análise desses dados.

Contudo, o emprego de tais recursos avançados é custoso, levando-se em consideração o alto grau tecnológico das ferramentas, e também de instrução dos profissionais responsáveis por operá-las. Sendo assim, é muito comum que se recorra a produtos gratuitos, disponibilizados por algumas agências nacionais e internacionais.

Embora o uso de produtos gratuitos consiga, em certa medida, reduzir o problema dos custos para a aquisição de dados, surgem outros desafios a serem enfrentados. Um desses desafios reside no fato de a maioria dos produtos gratuitos fornecer materiais com altos níveis de generalização, promovendo uma resolução espacial sem o nível de detalhe adequado à determinadas análises. Devido a isso, a depender da finalidade do estudo, a utilização de produtos gratuitos pode se tornar inviável.

Entre os diversos produtos de sensores espaciais e aerotransportados disponibilizados gratuitamente, encontram-se os Modelos Tridimensionais do Terreno (MTT), sendo que uma de suas variações é designada pelo termo Modelos Digitais de Elevação (MDE). Os MDE são responsáveis pelo *input* inicial na grande maioria dos modelos de análise espacial para estudos ambientais nas áreas de Geografia, Geomorfologia, Geologia, Hidrologia, Engenharia e diversas outras. No contexto brasileiro, com relação aos MDE de sensores espaciais, os MDE gerados pelo Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) são os mais utilizados nos estudos inscritos no extenso campo das denominadas Ciências da Terra.

Tal material provém originalmente da missão SRTM, que imageou a Terra durante onze dias a bordo do ônibus espacial *Endeavour*, em 2000. O dispositivo gerou imagens com uma

baixa resolução espacial, com células de 90 m entre as latitudes 56°S e 60°N (EMBRAPA, 2019a).

Esses produtos foram posteriormente refinados no Brasil, por meio de métodos de interpolação geoestatística para uma resolução espacial de 30m (VALERIANO, 2008; VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010; VALERIANO; ROSSETTI, 2010) a qual resultou na criação do sistema TOPODATA¹, cujo uso foi consagrado e validado em inúmeros trabalhos científicos no país.

Contudo, em 2014, o governo norte-americano, responsável pelos dados da referida missão espacial, liberou o acesso a dados SRTM com 30m de resolução a usuários comuns. Essa liberação possibilitou a aquisição de dados dos MDE na mesma resolução espacial do TOPODATA, tornando-se este, por conseguinte, um sistema secundário quanto à aquisição desse tipo de dado.

No entanto, os esforços de Valeriano refletem a necessidade de melhoras na resolução dos produtos disponibilizados gratuitamente, com o intuito de estabelecer produtos uma escala melhor de detalhe com um baixo custo para as pesquisas.

Ainda que sejam importantes os avanços promovidos na resolução espacial do SRTM e que, no Brasil, os produtos da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM) sejam largamente utilizados, a sua resolução espacial ainda não é adequada para estudos a uma escala de nível local.

Todavia, nos últimos quinze anos, surgiram sensores mais precisos, que geram MDE com melhores resoluções, tanto espaciais quanto temporais, do que a do SRTM. Dentre esses novos produtos, uma opção de acesso livre são os MDE do sensor PALSAR, a bordo do Satélite Japonês ALOS, lançado em 2006 pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) (EMBRAPA, 2019b).

Os MDE disponibilizados, resultantes do imageamento do sensor ALOS – PALSAR, apresentam resolução espacial de 12,5 metros; trata-se de um desempenho notável quando comparado aos de outros disponíveis para download nestas mesmas condições (acesso livre) que apresentam resoluções em média quase 3 vezes mais baixas.

¹ O projeto TOPODATA foi um esforços de diversos pesquisadores brasileiros em possibilitar “o livre acesso a dados que outrora exigiam capacitação específica no trato com modelos digitais de elevação (MDE) significa uma mudança para um novo panorama, em que os custos de se agregarem informações do relevo a estudos do meio físico se tornam sensivelmente reduzidos” (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010, p. 19) o qual a partir de dados do SRTM de 90m de resolução espacial, foram gerados por meio de técnicas de refinamento, MDE com 30m de uma série de outros subprodutos que tinha o objetivo de acelerar o processo de assimilação e uso de uma base de dados a nível nacional.

Autores como Barros et al. (2009) passam a defender que esses MDE gerados a partir do sensor ALOS – PALSAR podem ser de grande valia para a modelagem e para a geração de produtos cartográficos em locais com deficiência de bancos de dados espaciais com escala de detalhe um pouco melhor.

Cabe indagar, então: caso sejam aplicados os processos lógicos semelhantes, nos MDE do ALOS-PALSAR, àqueles executados nos diversos trabalhos de Valeriano no SRTM (VALERIANO, 2008; VALERIANO e ALBUQUERQUE, 2010; VALERIANO; ROSSETTI, 2010), seria possível estabelecer um MDE de resolução ainda melhor que a de 12,5m, com uma precisão cartográfica aceitável?

Pelo ponto de vista da lógica formal, a resposta seria favorável a tal processo de refinamento. Nessa direção, se Valeriano conseguiu com um MDE, logo, é possível fazer o mesmo com os demais. Todavia, é necessário compreender que embora uma ideia seja lógica, o simples pensamento dedutivo é passível de não se sustentar no âmago da prova empírica. Em outras palavras, existe a possibilidade de um pensamento ser lógico, mas não verdadeiro (BRAZARIAN, 1985).

Ciente disso, a presente pesquisa se dispõe a investigar como a forma e altimetria das feições geomorfológicas têm suas representações modificadas após o processo da geração de novos MDE com melhores resoluções espaciais, por meio de diversos interpoladores geoestatísticos. Além disso, essa investigação consiste em uma tentativa de verificar se os métodos de interpolação utilizados viabilizam melhoras nos produtos finais gerados, ou se, ao invés disso, geram novas falhas na representação da superfície terrestre, tomando como exemplo para este estudo os MDE do ALOS-PALSAR.

2 OBJETIVOS

2.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é verificar se MDE gerados com os dados do sensor ALOS-PALSAR, refinados em sua resolução espacial por meio de técnicas geoestatísticas de interpolação, sofrem modificações, quando a capacidade e representar a superfície modelada. Assim, objetiva-se constatar se eles podem ser adotados como alternativa para geração de levantamentos topográficos com maior detalhe em locais que possuem carência de dados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Interpolar informações altimétricas do ALOS-PALSAR, de acordo com vários métodos geoestatísticos.
- Comparar as matrizes MDE do ALOS-PALSAR e seus subprodutos (declividade e hipsometria), com um MDE gerado a partir de um sensor com maior qualidade, no caso, gerados a partir de dados obtidos através do sensor LIDAR de forma quantitativa e qualitativa.
- Verificar, por meio de perfis de relevo, como os aspectos de altimetria, conformidade e forma são representados.
- Observar como ocorre as alterações nas formas dos relevos durante o processo de interpolação de novos MDE derivados de dados do ALOS-PALSAR.
- Constatar a validade ou não dos produtos interpolados do ALOS-PALSAR como alternativa gratuita a MDE com maior resolução pagos, por meio de uma avaliação integrada entre fatores quantitativos e qualitativos dos MDE e seus subprodutos.

3 ESTADO DA ARTE

A fim de embasar a proposta apresentada, serão abordadas temáticas importantes para as discussões em conformidade com a linha de pesquisa adotada pelo presente trabalho e com as opções teórica, epistemológica e metodológica do autor. No entanto, cumpre salientar que de forma alguma é fácil promover esse resgate dos campos e conceitos científicos, porque estes dependem tanto da evolução histórica de cada área do saber que se pretende resgatar, quanto da percepção do pesquisador ao interpretar tais mudanças. Como ensina Memória, “Não é tarefa fácil saber quando se originou a história de qualquer ramo do conhecimento, pois isso vai depender do conceito que fizermos dele e que, naturalmente, evoluirá no decorrer do tempo” (MEMÓRIA, 2004, p. 10).

Considerando tal aspecto, cumpre realizar uma breve explanação sobre Estatística e Geoestatística. Em seguida, parte-se para um debate sobre Modelos, considerados no que tange à ciência, à Geografia brasileira e aos MDE. Por fim, dedica-se um momento para discorrer acerca de questões ligadas ao Geoprocessamento e Sistemas de Informações Geográficas (SIG), uma vez que as análises serão feitas, em sua maioria, em ambiente SIG.

3.1 ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA

Como já dizia Heráclito, “não se pode banhar no mesmo rio duas vezes, pois nem o Homem e nem o rio são os mesmos”. É possível ainda complementar sustentando que, ao sair do rio, nem o homem e nem o rio seriam também os mesmos como Heráclito sustenta, mas ambos levariam um pouco de cada um consigo, pois ao sair do rio molhado, o homem levou um pouco da água do rio consigo e, conseqüentemente, deixou um pouco de si no próprio rio.

É nesse sentido filosófico que se enquadra a história da estatística, a qual ao mesmo tempo em que colaborou para o avanço de diversas áreas do conhecimento, também recebeu, em seu desenvolvimento, contribuições importantes de estudiosos de outras áreas do saber.

A tentativa de uma retomada histórica da origem do termo “estatística” não parte de um consenso geral, já que nem mesmo os diversos autores da área de linguagens dedicados à etimologia têm uma posição única sobre o termo. O “Dicionário Etimológico da Língua Portuguesa”, elaborado por Nascentes (1955), destaca que o termo tem a sua origem do grego. Outras fontes, como Memória (2004), defendem que, na verdade, o termo tem seu nascimento no latim, e que originalmente estava fortemente relacionado de forma geral com a administração do Estado, de modo que a palavra é “usada aqui para designar a coleta e a apresentação de dados quantitativos de interesse do Estado”(MEMÓRIA, 2004, p. 10).

Lopes e Meireles (2005) também contribuem para a definição do termo, advogando sobre suas origens frente a outros idiomas como o alemão e italiano, além do seu sentido na língua inglesa, o mais utilizado atualmente, que se aproxima mais das considerações de Memória (2004) do que da concepção de Nascentes (1955):

Ao verificarmos a etimologia da palavra estatística, defrontamo-nos com o registro da forma italiana *statistica*, desde 1633, com o sentido de “ciência do estado”. Do alemão *Statistik*, originou-se a palavra francesa *Statistique* em 1771; a espanhola *Stadística* em 1776; a inglesa *statistics* em 1787; e, finalmente, a portuguesa *Estatística* no início do século XIX. Contudo, o emprego da palavra estatística, no sentido que ela tem hoje, deve-se ao economista alemão Gottfried Achenwall que, entre 1748 e 1749, registrou em seu livro “Introdução à ciência política” a palavra alemã “*statistik*”, que vem de “*status*” que, em latim, significa “estado”. (LOPES; MEIRELLES, 2005, p. 2)

Contudo, embora a ideia que se tem comumente de estatística tenha surgido apenas na era moderna e se desenvolvido na era contemporânea, houve a utilização da lógica estatística para a compreensão, a manipulação e o tratamento de dados anteriormente.

Isso se comprova uma vez que gregos, romanos, egípcios, chineses, entre outros povos antigos já realizavam censos e levantamentos estatísticos extremamente complexos. Um claro exemplo dessa utilização é situada no que atualmente se chama de China, há mais de 4 mil anos quando: “Yao, nessa época, mandou fazer uma verdadeira estatística agrícola e um levantamento comercial do país”(LOPES; MEIRELLES, 2005, p. 1).

3.1.1 A estatística moderna – O surgimento de um ramo do conhecimento científico

A Geografia e a Estatística sempre tiveram uma forte ligação. Isso pois foi e ainda é impossível para a primeira abarcar toda a realidade em suas análises. Daí se explica a pertinência do uso e das análises de amostras a partir de uma ferramenta de grande importância como é a segunda. Talvez seja por isso que o primeiro trabalho de estatística moderna esteja ligado a um dos principais ramos da Geografia: a Demografia.

Este trabalho pioneiro foi a obra de Graunt (1620 – 1674), intitulada “*Natural and Political Observations Mentioned in a Following Index and Made upon the Bills of Mortality*”. Contudo, na realidade, foi seu discípulo William Petty (1623 – 1683) o responsável pela continuidade e pelo aprimoramento de suas teorias (MEMÓRIA, 2004).

William Petty, como a maioria dos estudiosos de sua época, era polivalente, atuando em diversas áreas. Contudo, a sua maior contribuição para a estatística foi a sistematização dos estudos de Graunt e sua aplicação no entendimento da sociedade. Alguns estudiosos do tema

argumentam que de fato suas maiores realizações estão ligadas à matematização do método estatístico, porém McCormick (2009) acredita que as contribuições de Petty foram ainda superiores a isso para a ciência estatística:

Scholars of Petty's work often emphasize the significance of mathematics, and especially his use of quantitative data-gathering and argument, as a precocious anticipation of much later statistical social science or economics. Many correspondingly assume that Petty's intention was to produce a statistical form of social analysis. A closer look at his actual proposals suggests otherwise. In the thick of argument it was not precise, absolute numbers but rough, relative proportions that mattered: the ratios of French ships to Dutch, of Protestants to Catholics in Ireland, and so on. These numbers were less important as facts in themselves than as a shorthand for making telling comparisons—props to argument and spurs to action. Perhaps ironically, it was by serving this explicitly discursive function that they extended the potential scope of calculation most dramatically—as Petty's search for equations linking land and labor to art, opinion, interest, reputation, and a host of other conventionally unidentifiable things illustrates. (MCCORMICK, 2009, p. 206)

Concomitantemente aos estudos de Petty e Graunt, alguns matemáticos, na busca por solucionarem problemas de jogos de azar, começam a desenvolver paralelamente estudos mais elaborados sobre a probabilidade, mas não necessariamente ligados e integrados à estatística:

No século XVI, o matemático e jogador italiano, Jerónimo Cardano (1501-1576), decidiu estudar as probabilidades de ganhar em vários jogos de azar. Analisou seriamente as probabilidades de retirar azes de um baralho de cartas e de obter “setes” com dois dados e publicou os resultados dessas pesquisas em um manual para jogadores chamado “Liber de Ludo Aleae” (O livro dos jogos de azar - 1526). Cardano é considerado iniciador da teoria das probabilidades, pois foi o primeiro a fazer observações do conceito probabilístico de um dado honesto e a escrever um argumento teórico para calcular probabilidades. Ele afirmou que, ao jogar dados, a chance de se obter um, três ou cinco era a mesma de se obter dois, quatro ou seis. Apesar disso, muitos autores atribuem a origem dessa teoria às correspondências trocadas entre Pascal e Fermat em que falavam do objetivo de se obter solução dos problemas de jogos de azar propostos, em 1653, por Chevalier de Méré, conhecido como filósofo do jogo que também interessou-se pelo uso da Matemática para determinar as apostas nos jogos de azar. (LOPES; MEIRELLES, 2005, p. 1)

Se atualmente a estatística e a probabilidade são naturalmente indissociáveis, a realidade é que essa nem sempre foi uma verdade absoluta. Somente através das considerações de Quételet (1796 –1874) a estatística se alinhou mais fortemente à probabilidade, ele “foi quem primeiro percebeu que a Estatística deveria ser baseada na noção de probabilidade.” (MEMÓRIA, 2004, p. 20)

Não é possível ainda um resgate histórico da estatística sem considerar as contribuições dos mais famosos estatísticos da era contemporânea, quais sejam, Karl Pearson e Galton e ainda William Sealy Gosset (mais conhecido como Student). Os dois primeiros são responsáveis pela

fundação da escola Biométrica estatística, pautada na matemática e na probabilidade, inspirados por Quételet.

As colocações de Karl Pearson e Galton foram importantes para o desenvolvimento das relações de correlação, de regressão, de distribuições não normais e para o teste do Qui-Quadrado. A correlação de Pearson, por exemplo, vai tentar responder qual é a relação entre **A** quando comparado a **B**, uma questão corriqueira em análises do dia-a-dia. E mesmo que tal coeficiente seja apenas ligado a Person, é evidente que durante a sua elaboração o estudioso teve, em grande parte, contribuições diretas do próprio Galton nas formulações matemáticas e teóricas (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009).

Um dos principais discípulos de Pearson foi William Sealy Gosset (1876 - 1937), que, diferente de Pearson e Galton, foi responsável por elaborar estudos estatísticos em uma perspectiva mais aplicada à realidade e à resolução de problemas reais.

Diversos estudiosos da época, inclusive Pearson, acreditavam que as análises estatísticas deveriam partir de grandes populações amostrais a fim de dar um aporte maior de confiabilidade às análises. Todavia, Gosset sustentava que era possível, através de amostras bem selecionadas, obter resultados tão fidedignos quanto aqueles obtidos através de grandes amostras, já que se tornava extremamente custoso e até mesmo inviável a obtenção destas últimas para estudos aplicados.

Nesse contexto, no entanto, tais considerações não foram bem apreciadas por conta do posicionamento de Karl Person, para quem “as pequenas amostras não eram fidedignas, devendo ser evitadas” (MEMÓRIA, 2004, p. 34) e também em razão da dificuldade apresentada por Gosset em conciliar a matemática de maneira consistente e elegante em suas formulações.

Somente anos mais tarde Ronald Fisher (1890 – 1962) compreendeu a importância do trabalho de Grosset, contribuindo com o desenvolvimento de fundamentações teóricas para tal teoria (MEMÓRIA, 2004), conseguindo até mesmo ir além e conciliar as formulações de Pearson e a de Grosset, solucionando, então, certos problemas entre ambas abordagens:

(...) foi responsável por muitas; por exemplo, em 1912, no artigo *On an Absolute Criterion for Fitting Frequency Curves*, propôs o conceito de máxima verossimilhança (maximum likelihood). Em 1924 publicou *On a Distribution Yielding the Error Functions of Several Well Known Statistics*, onde apresentou, numa mesma estrutura, as distribuições do χ^2 (qui quadrado) de Karl Pearson (1857-1936) e do t de Student (W.S. Gosset, 1876-1937). (CRUZ, 2016, p. 6)

Entretanto, são seus trabalhos de inferência que despertam especial interesse no escopo desta pesquisa, já que Fisher foi o primeiro a promover, de modo eficiente, tais tipos de análises, reformulando as ideias de probabilidade inversa que imperavam na época a qual abominava. E

como Fisher mesmo destaca, tais concepções probabilísticas deveriam ser abandonadas, porque:

This is not the place to enter into the subtleties of a prolonged controversy; it will be sufficient in this general outline of the scope of Statistical Science to reaffirm my personal conviction which I have sustained elsewhere, that the theory of inverse probability is founded upon an error, and must be wholly rejected. (FISHER, 1954)

Essa posição de Fisher, como explica o próprio Matheron, é sustentada pelo fato de a estatística clássica, naquela época, já dava graus de insuficiência para as análises espaciais. Essa insuficiência se deve à dependência da estatística de repetir o teste indefinidas vezes e atribuir o número de probabilidade a tal repetição, condicionada à interdependência entre os testes anteriores (MATHERON, 1963). Um exemplo que ilustra essa percepção é o ato de jogar uma mesma moeda várias vezes no ar e calcular a probabilidade de cara ou coroa.

Porém ao se colocar essa lógica à prova com variáveis especializadas, as quais não é possível repetir o teste em um mesmo lugar várias vezes a fim de determinar o grau de probabilidade, a estatística clássica demonstra sua insuficiência. Pois cada local é tão singular a ponto de ser impossível repetir testes várias e várias vezes, e mesmo qualquer tentativa de contornar tal realidade, com uma amostra próxima a fim de promover essa repetição, a segunda:

When the grade of a sample is concerned, which may be a groove sample of a given size for example, the result is exactly the same, because the grade of a groove located in a point with coordinates (x, y) is unique and well determined. However, it is possible to pick a second sample close to the first, then a third one, etc. which shows an apparent possibility of repeating the test. Actually, it is not exactly the same test but a slightly different one. But even assuming this possibility of repetition, the second property will surely not be respected. Two neighboring samples are certainly not independent. They tend, in average, to be both high-grade if they originate from a high-grade block of ore, and vice-versa. This tendency, more or less stressed, expresses the degree of more or less strong continuity in the variation of grades within the mineralized space. The misunderstanding of this fact and the rough transposition of classical statistics has sometimes led to surprising misjudgments (MATHERON, 1963, p. 1248).

Essa dificuldade da estatística clássica em modelar variáveis espacializadas promoveu o surgimento de um campo específico da estatística para trabalhar com dados e incertezas espacializadas: a Geoestatística.

Ao passo que é possível concluir que a estatística deu aporte para trabalhos com grandes incertezas, que normalmente afligem as análises espaciais dos geocientistas, e as geociências possibilitam aos estatísticos buscarem novas direções de pesquisa mais aplicadas (AGTERBERG, 2004). Assim, nota-se que a troca de saberes entre os estudiosos das Ciências

da Terra e a matemática/estatística passou a se tornar vantajosa para ambos os campos de conhecimento.

3.1.2 Geoestatística

A Geoestatística propriamente dita nasce na década de 1960, com a Teoria da Regionalização de George Matheron (1930 - 2000), fruto de diversas publicações relacionadas à divulgação de estudos sobre a localização e o volume de jazidas de ouro na África do Sul de Krige (1919 – 2013) e às colocações de inferência estáticas de Pearson, Student e Fisher ao longo da década anterior. Tais artigos sustentavam a possibilidade de se inferir a distribuição espacial de um determinado evento observando algumas variáveis presentes ou não em uma determinada área (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A partir desses trabalhos, surgiram vários estudos aplicando e desenvolvendo métodos de inferência espacial distintos, buscando correlações entre variáveis distribuídas “aleatoriamente” pelo espaço, no esforço de encontrar os seus padrões de distribuição. Tais estudos ensejaram a construção de um aporte teórico robusto, com técnicas capazes de determinar com exatidão a localização, o comportamento e a distribuição de certos fenômenos espacialmente distribuídos através de amostras.

O enorme empenho desses pesquisadores propiciou o desenvolvimento de diversos métodos para a inferência de valores de dados espaciais na Geoestatística: a Ponderação do Inverso das Distâncias; a Quebra Natural; e a Krigagem com as suas variações, o método do Vizinho Natural, Spline, Redes Neurais, entre tantos outros. Dessa maneira, é necessário destacar, na evolução de tais técnicas para a Geoestatística e para a Geografia, as contribuições de três grandes pesquisadores do campo: George Frederick Jenks e Danie G. Krige, bem como o próprio Matheron.

O primeiro e mais contemporâneo é George Frederick Jenks (1916 – 1996) o único “geógrafo²” a ocupar uma cadeira no panteão dos autores de grandes métodos geoestatísticos. Logo após deixar o exército, Jenks inicia seus estudos na Universidade de Syracuse, fazendo uma pós-graduação em Geografia. Inicialmente o estudioso tinha gosto pela Geografia agrária, mas foi a Cartografia que lhe despertou grande paixão (MCMASTER, 1997).

² Na realidade Frederick Jenks se formou em pedagogia após sair das forças armadas estadunidenses, mas suas pós graduações estão relacionadas com Cartografia e principalmente Geografia, por isso ele pode ser considerado como um Geógrafo mesmo não possuindo formação a nível de graduação formal na área.

Anos mais tarde, já como professor de Cartografia da Universidade do Arkansas, o pesquisador em questão passou a se ocupar de estudos de técnicas de cartografia moderna, e suas considerações foram importantes a ponto de renderem-lhe diversas honrarias. Nesse espírito chamava sua atenção a crescente necessidade de se compreender com clareza as potencialidades e limites da cartografia por parte dos geógrafos, levando-o a argumentar que uma cartografia amadora poderia de fato causar grandes estragos para o mapeamento (MCMASTER, 1997):

His particular concern was that geographers apply computer-based methods of generalization with logic and consistency, and that they have a clear understanding of both the geometric and perceptual errors associated with the application of automated methods. In general, George had become very concerned with the potential for slippery amateur cartographers to wreak havoc in the world of mapping. (MCMASTER, 1997, p. 4)

Uma contribuição importante de Jenks é a Quebra Natural, um método de espacialização que busca minimizar os erros de dados espacialmente distribuídos conforme a distribuição das classes, observando e agrupando suas continuidades e descontinuidades. Assim, ao observar-se toda uma população de dados e promover-se o agrupamento de classes entres eles, é possível determinar os intervalos de valores capazes de levar ao menor erro possível na representação (FERNANDES, et al., 2013).

A Krigagem, por outro lado, foi inicialmente elaborada por Danie G. Krige (1919 – 2013), cujas considerações foram de grande valia para a Teoria da Regionalização de Matheron (1962) que de fato é o marco inicial de fundação da Geoestatística.

Bem como toda uma geração de grandes geoestatísticos, Krige nasce na África do Sul, onde anos mais tarde, após se formar como geólogo, vai trabalhar na empresa *Anglovaal*, o que lhe rendeu grande experiência prática e de campo no processo de sondagem, análise e perfuração na busca por recursos minerais (MAGRI, 2014).

Sua atuação foi tão bem-sucedida frente à *Anglovaal*, que o profissional foi convidado a integrar e a chefiar o Departamento Nacional de Engenharia Geológica da África do Sul. Nessa missão, Krige enfrentou diversos problemas nas análises de sondagens de recursos minerais no país.

Tais problemas se devem à necessidade de Krige de gerir, dimensionar e distribuir uma série de estudos de sondagem, contando, no entanto, com um número de furos limitados, haja vista o alto custo desse tipo de análise. Diante de tal realidade, Krige passa a se interessar pelo estudo da estatística aplicada na tomada de decisão. Nessa direção, no decorrer de seu mestrado,

tenta elaborar um método estatístico a fim se solucionar o problema de tomada de decisão para variáveis espacialmente distribuídas, conquistando grande êxito (RAMANI, 2015).

Anos mais tarde, Matheron teve acesso aos estudos de Krige e promoveu um aprimoramento de técnicas e uma adaptação das formulações de Krige na sua teoria da regionalização, batizando o seu método de *kring* (Krigagem) em homenagem a Krige, e fundamentando o marco inicial da Geoestatística propriamente dita (MINNITT; ASSIBEY-BONSU, 2013).

George Matheron (1930 - 2000), assim como Krige, também trabalhou com mineração no continente africano. Seu primeiro trabalho após se formar foi no departamento de mineração francês na Argélia em 1955. Os artigos iniciais que Matheron escreveu, de fato, aparentavam ser obras de um geólogo aplicando a estatística clássica. Contudo, alguns autores defendem que seus trabalhos apresentavam uma visão singular a qual deu possibilidade a uma série de contribuições importantes para a estatística espacial, principalmente a partir da década de 1960 (AGTERBERG, 2004).

A sua experiência prática e seu contato com as considerações de Krige publicadas anos antes, faz com que, ao longo da década de 1960, Matheron passe a se ocupar estudando e desenvolvendo métodos matemáticos e estatísticos com vistas a uma solução para o problema de estimativas de volumes de recursos naturais apenas com informações parciais de amostras.

Suas contribuições são de tamanho impacto e notoriedade que vão incentivar a criação, em 1968, de um centro de pesquisa voltado à Geoestatística e à análises espaciais, o *Centre de Géostatistique et de Morphologie Mathématique* (JEULIN, 2000).

Entretanto, por mais que atualmente sejam amplamente aplicados, os postulados de Matheron sobre a geoestatística e sua teoria da regionalização, tais concepções foram um motivo de grande embate. Desse modo, suas teorizações sofreram grande resistência por parte de outros especialistas da área. Yamamoto e Landim destacam que Whitten propunha o abandono do método de regionalização desenvolvido por Matheron baseado na Krigagem pelo uso de métodos de interpolação por regressão polinomial:

As ideias de Matheron, porém inicialmente suscitaram forte oposição por parte dos geólogos e engenheiros de minas. Assim, por exemplo, com relação ao estimador da Krigagem, Whitter (1966) preferia a interpolação por regressão polinomial, isto é, por análise de superfície de tendência. Matheron (1967) respondeu a essa crítica num artigo denominado *Kriging, or polynomial interpolation Procedures?*. (YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p. 10)

Essa postura intelectual de desconfiança frente às postulações de Matheron levantadas por Whitten também foi destacada por Agterberg, que demonstra uma posição um pouco mais

enfática em resposta às colocações equivocadas de Whitten quanto à possibilidade de as aplicações de regressão polinomial serem superiores a concepções elaboradas por Matheron:

This article stated that the kriging procedure is valid for stationary or intrinsic random functions. Whereas The polynomial interpolation procedure should be applied only in specific situations where an error $e(x)$ is superimposed on a regular phenomenon $m(x)$. Matheron presented an example of **"how striking but fallacious evidence for a real trend may occur as a result of purely random cumulative effects."**³ This example was based on a random-walk process model with stationary and stochastically independent increments rather than independent values.(AGTERBERG, 2004, p. 330)

Com o passar do tempo, essa “guerra de estimadores” e estimados homens da ciência foi se dissipando e a Geoestatística de Matheron passou a ser gradualmente aceita. A partir da década de 1980, a metodologia geoestatística baseada em Matheron tem a mais ampla aplicação, sendo utilizada em vários campos desde a Agricultura de Precisão, passando pela Análise Espacial de Crimes, Cartografia, Geologia, Epidemiologia e tantas outras áreas de estudo. A influência da metodologia é tamanha que atualmente quase todos os *softwares* de análise espacial ou sistemas de informações georreferenciadas contam com ferramentas para a aplicação de tais métodos (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

No entanto, mesmo que ao longo dos anos ocorressem o desenvolvimento de vários métodos geoestatísticos, o próprio Matheron percebia outro tipo resistência no uso da geoestatística ainda nos anos 1970 para além das considerações de Whitten.

Tal autor entendia que, no uso da geoestatística para a mineração, haviam três autores principais: o matemático, cujas preocupações não contemplavam a realidade das minas; o geólogo, que não compreendia bem a matemática e fugia tão logo visse uma integral no quadro-negro; e, finalmente, o próprio mineiro, que tinha experiência prática e não estava interessado em considerações abstratas e totalmente distantes da prática cotidiana (MATHERON, 1976).

Essa falta de entendimento matemático das relações geoestatísticas pelos geólogos é destacada por Landim como uma condição ainda atual, que impossibilita a sua popularização nos estudos de Geologia no Brasil:

A aceitação por parte dos geólogos tem sido bem maior no tocante à Tectônica Global, e isso pode ser facilmente constatado nos livros textos de Geologia básica recente, que apresentam e discutem tais conceitos. O mesmo não acontece com a aplicação de modelos quantitativos, utilizando-se ou não de computadores, e isso porque os geólogos acostumados com o método das múltiplas hipóteses julgam que conseguem lidar com fenômenos naturais

³ Matheron fala que os resultados obtidos através de estimadores polinomiais por Whitten são na realidade uma evidência impressionante, mas falaciosa, de uma tendência real que pode ocorrer como resultado de efeitos cumulativos puramente aleatórios – **Tradução Livre do autor**

apenas em termos qualitativos, e acabam por criar uma barreira entre os dados obtidos e seu manuseio. Um dos motivos alegados, inclusive, é que os métodos quantitativos apresentados são tidos como extremamente complexos e numa linguagem matemática de difícil entendimento. (LANDIM, 2006, p. 20)

Se tal movimento ocorre com certa expressividade na Geologia, uma das Ciências da Terra fortemente relacionadas às Ciências Exatas, esse movimento é mais preocupante ainda dentro da Geografia brasileira. Por conta de sua ligação um pouco mais alinhada com as Ciências Humanas, e pelo protagonismo de seu processo de quebra do paradigma teórico quantitativo, promoveu-se um distanciamento dos geógrafos no que concerne a técnicas de espacialização e de análise espacial.

Isso resultou na construção de uma realidade para a Geografia, em cujos trabalhos a geoestatística é ignorada, subutilizada, ou, ainda pior, usada à revelia sem o correto entendimento das potencialidades e insuficiências das técnicas empregadas.

Embora já fosse destacado por Matheron que os computadores e ambientes SIG seriam uma importante ferramenta para o desenvolvimento da Geoestatística, ele preocupava-se que com a possibilidade de um quarto agente, o técnico de informática, ou profissional de TI acabar se tornando mais importante do que o próprio profissional de geociências (MATHERON, 1976).

Quase 50 anos depois, os temores de Matheron não se concretizaram, visto que atualmente, graças aos SIG, as técnicas de análise espacial e geoestatística são largamente utilizadas e populares entre geocientistas que nem de longe foram substituídos pelos profissionais da informática.

De fato, não ocorreu uma ascensão dos profissionais de TI nas geociências através do SIG. Inversamente, tais ferramentas ensejaram até mesmo uma valorização dos geocientistas. Porém, observa-se uma preocupante realidade que os SIG fomentaram para a geoestatística que fugiram das reflexões dos temores expressos por Matheron: se por um lado os SIG possibilitam, com seus inúmeros métodos de inferência espacial, uma maior popularização de seu emprego, por outro, abrem a possibilidade de profissionais sem o domínio teórico de tais formulações aplicá-las e gerarem resultados equivocados.

Em razão disso, resultados sem o rigor teórico e metodológico estatístico/geoestatístico podem se transverter em científicos, sem o serem propriamente. Assim, os problemas de um falso tratamento estatístico/geoestatísticos em dados científicos, se apresentam de várias formas, os quais na estatística e na matemática podem ser chamados de números de *Potemkin*, *Desestimativas* ou ainda de “*Empacotamento de Frutas*”, que basicamente são todos erros de geração e interpretação de informações baseados nas estatísticas. Esses três erros vão se

diferenciar basicamente entre si quanto à forma como se aplica erroneamente uma técnica estatística, como o interpretar ou como apresenta seus resultados:

HÁ MUITOS CAMINHOS que levam a falácias matemáticas. Os números de Potemkin produzem estatísticas sem significado. A desestimativa distorce os números, transformando-os em falsidades, ao ignorar suas limitações inerentes. Um terceiro método, o do empacotamento de frutas, é ligeiramente diferente. Neste método, os números, tomados isoladamente, não são falsos? a apresentação, a embalagem dos dados, é que produz a adulteração. (SEIFE, 2012, p. 22–23)

Deste mesmo modo, as escolhas a esmo de métodos ou técnicas estatísticas inconsistentes com a temática abordada, do tipo de amostra ou população podem provocar uma incongruência dos resultados obtidos, ou a manipulação para a construção de um discurso escuso da verdade.

Na realidade “It is easy to lie with statistics. It is hard to tell the truth without it.” (VARSAVSKY; MAREELS; COOK, 2016, p. 89)⁴, por isso a escolha do método usado deve ser feita com total conhecimento de suas deficiências e potencialidades, bem como com a compreensão das formulações teóricas e metodológicas, evitando gerar resultados enganosos, simplesmente por ter acesso a ferramentas que permitem a sua aplicação.

3.2 OS MODELOS

3.2.1 Ideia de modelo no fazer científico

O mundo é extremamente complexo, de maneira que qualquer tentativa de compreender algum de seus aspectos – independente da escala – demanda um grau maior ou menor de simplificação e de abstração. Nesta perspectiva, toda tentativa de explicar o mundo a partir do fazer científico é, na verdade, a construção de um modelo explicativo da realidade.

A simplificação a partir de abstrações é o *modus operandi* de uma grande parte os campos científicos. O imperativo é o de que somente através do conhecimento racional é possível a construção do saber científico. Dito de outro modo, “O homem, ser racional, tem a razão que lhe permite penetrar no fundo das coisas” (BRAZARIAN, 1985, p. 107) e assim compreender a origem, a forma e o funcionamento do mundo, possibilitando o próprio fazer científico.

⁴ “É fácil mentir com estatísticas. É difícil dizer a verdade sem elas.” - Tradução livre do autor

Um dos postulados mais básicos do conhecimento racional se inicia pela formulação de conceitos, os quais são, basicamente, imagens abstratas da realidade, a qual não pode ser abarcada em sua totalidade pelos sentidos. A elaboração dos conceitos, passa no mínimo por quatro fases fundamentais: Análise; Síntese, Abstração e Generalização:

A) Análise: Operação mental que consiste em decompor um todo (objeto ou fenômeno) em seus elementos constituintes, a fim de compreender o lugar que eles ocupam e o papel que desempenham no todo. **B) Síntese:** Operação mental que, ao inverso da análise, consiste em recompor um todo (objeto ou fenômeno) a partir de seus elementos constituintes, a fim de compreendê-lo em sua totalidade, em seu conjunto. **C) Abstração:** (Vem do latim *ab trahere* = *tirar de*): Operação mental que consiste em isolar ou separar, para considerá-lo à parte, um elemento de um todo que não é separável na realidade, a fim de distinguir o acidental (particular) do essencial (geral) – aquilo que é sempre o mesmo em objetos diversos, independentes de suas particularidades individuais. **D) Generalização:** Operação mental que consistem em estender a toda uma classe de objetos ou fenômenos os elementos essenciais, gerais universais, constatados num certo número de objetos ou fenômenos da mesma classe. (...) Tanto a análise e a síntese, como a abstração e generalização são processos mentais inseparáveis uns dos outros, isto é, não existem separadamente. (BRAZARIAN, 1985, p. 108)

Assim, é possível entender, então, que todo o processo de construção do saber racional parte do processo de simplificação e de seleção dos fatores que compõem a realidade a fim de conceituá-los. Face a essa realidade, torna-se justo afirmar que o próprio objetivo do conhecimento racional (e conseqüentemente da ciência) é construir modelos explicativos simplificados de determinada realidade observada, para responder e solucionar questões e problemas levantados (CAMARENA, 2002).

Contudo, ocorre um problema semântico em relação ao termo modelo, tendo em vista o seu caráter polissêmico. Cientes de tal característica, Chorley e Haggett destacam que “O termo modelo é empregado convencionalmente de várias maneiras. É usado como substantivo, significando uma representação; como adjetivo, significando grau de perfeição; ou como verbo, significando demonstrar ou apresentar como é alguma coisa (Ackof, Gupta e Minas, 1962, Pág. 108)” (CHORLEY; HAGGETT, 1975, p. 4).

Já Harvey, na década de 1960, em seu livro “Explanation in Geography”, que posteriormente recebeu uma versão em espanhol com o nome “Teorías, Leyes y Modelos em Geografía”, expressa tal questão por um viés mais duro, já que devido:

La multiplicidad de funciones de los modelos hace muy difícil su definición. Por supuesto que se han resultado perfectamente adecuadas, ya que la función que asumen los modelos en determinadas disciplinas académicas puede ser muy específica. En matemáticas y en lógica los modelos están altamente especializados y son enteramente definibles.(HARVEY, 1983, p. 159)

Observa-se ainda que, se por um lado, em alguns campos da ciência, a definição do termo *modelo* é bem rígida, por outro, existem áreas do conhecimento em que essa palavra se espalha e multiplica seus significados:

Surppes (1961) ha examinado este ejemplo de definición rigurosa del término *modelo*, contratándolo con las interpretaciones, mucho menos rigurosas, que le dan al término algunos científicos. Esta interpretación rigurosa no permite que el modelo funcione como habíamos indicado anteriormente, y no es muy aconsejable desde el punto de vista de la investigación empírica creativa. Por otro lado, los empiricistas adoptan a menudo una definición tan vaga del término que casi se pierde todo sentido. (HARVEY, 1983, p. 159–160)

Devido a essa característica semântica da terminologia *modelo*, não é raro seu uso equivocado ou sua apreensão como sinônimo de outros termos científicos. Haggett e Chorley expuseram essa preocupação ao destacarem que não se pode cometer o equívoco de comparar os modelos aos paradigmas⁵ pois suas dimensões são de escalas distintas:

Os paradigmas podem ser considerados modelos estáveis da atividade científica. São em certo sentido modelos em escala ampla, mas diferem dos modelos no sentido usado acima porque: 1) raramente são formulados tão especificamente; e 2) tratam-se de modelos de busca do mundo real em vez do seu próprio mundo. Os cientistas cuja a pesquisa se baseia em paradigmas comuns estão empenhados nos mesmos problemas, regulamentos e padrões, isto é, formam uma comunidade contínua e dedicada a uma tradição particular de pesquisa. Num sentido então, os paradigmas podem ser considerados aqui como “supermodelos”.(CHORLEY; HAGGETT, 1974, p. 8)

Harvey (1969) também faz colocações sobre o equívoco de se atribuir aos modelos funções de outras terminologias, como as das teorias. A sua interpretação é a de que os modelos estão à serviço das teorias, dando aporte a seus postulados:

Pero escritores como Braithwaite (1960), Nagel (1961) y Brodbeck (1959) han resaltado que los modelos deben considerarse diferente de las teorías. Sus estas diferencias de opinión fuesen sólo una cuestión de semántica, sería inútil continuar examinando el asunto. Pero este último grupo de escritores ha afirmado con convicción que existen serios peligros en confundir lo que llaman <<un modelo para la teoría>> con la propia <<teoría>>. (HARVEY, 1983, p. 160)

Desse modo, “Esta confusión que plantean refleja las controversias metodológicas en geografía” como destaca Harvey (1983, p. 160) argumentando que:

Con arreglo a esta interpretación, una función importante de modelo sería proporcionar una interpretación de la teoría << en tanto que cada fase integrante de la teoría es un juicio con un si con un significado (Nagel, 1961, 96). Sin embargo, el modelo no funciona con un texto, ya que el texto conecta

⁵ Cabe aqui salientiar que, como sinônimo de paradigma, pode ser trabalhado na concepção de Haggett e Chorley sendo sinônimos Leis ou grandes Teorias que regem um campo científico ou ainda toda a ciência. Podemos tomar como exemplo ainda a teoria da relatividade que, de longe, é um dos paradigmas mais famosos da atualidade.

la formulación abstracta de la teoría a todo el campo de la teoría. (HARVEY, 1983, p. 160)

Por isso, Camarena (2002), em seu livro “Leyes Teorías y Modelos” estabelece de maneira bem simples a função dos modelos frente às teorias. Advogando que esses não são simples sinônimos, mas na realidade estão a serviço da comprovação e do entendimento das teorias, alinhando-se à ideia expressa por Harvey (1983)

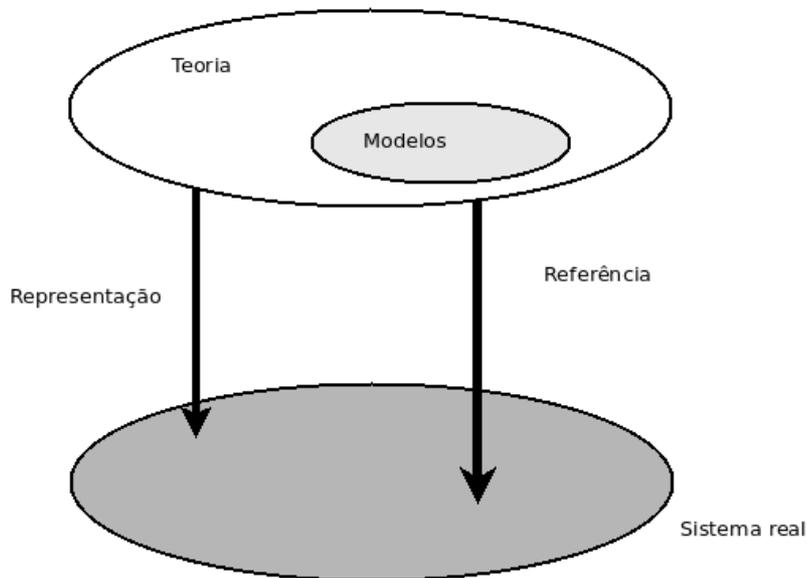
Una de las características del modelo es que, a la vez que facilita la comprensión de la teoría (porque la representa de manera simplificada), nos muestra sus aspectos importantes. El modelo describe una zona restringida del campo cubierto por la teoría; la teoría incluye modelos y éstos la representan justamente mostrando la referencia que hace la teoría a la realidad (...) Los modelos son medios para comprender lo que la teoría intenta explicar; enlazan lo abstracto con lo concreto. Al hacer referencia a lo concreto, el modelo se nos presenta más cercano a la imaginación, y nos ayuda a comprender mejor; y también se nos presenta más cercano a la experiencia. Gracias al modelo las teorías pueden someterse a comprobaciones empíricas con mayor facilidad. (CAMARENA, 2002, p. 57)

Tal autora destaca um esquema representativo, o de Mario Bunge, da posição ocupada pelos modelos e teorias científicas para entender a sua funcionalidade na ciência, pois conclui que são (os modelos), na realidade, fragmentos das próprias teorias.

Por meio de dois vetores, a saber, o da **referência** e o da **representação**, teorias e modelos tentam refletir e se “encaixar” o mais perfeitamente possível no mundo real, mesmo que tal anseio implique um trabalho de *Sísifo*, conscientes da impossibilidade de uma apreensão total (Figura 1).

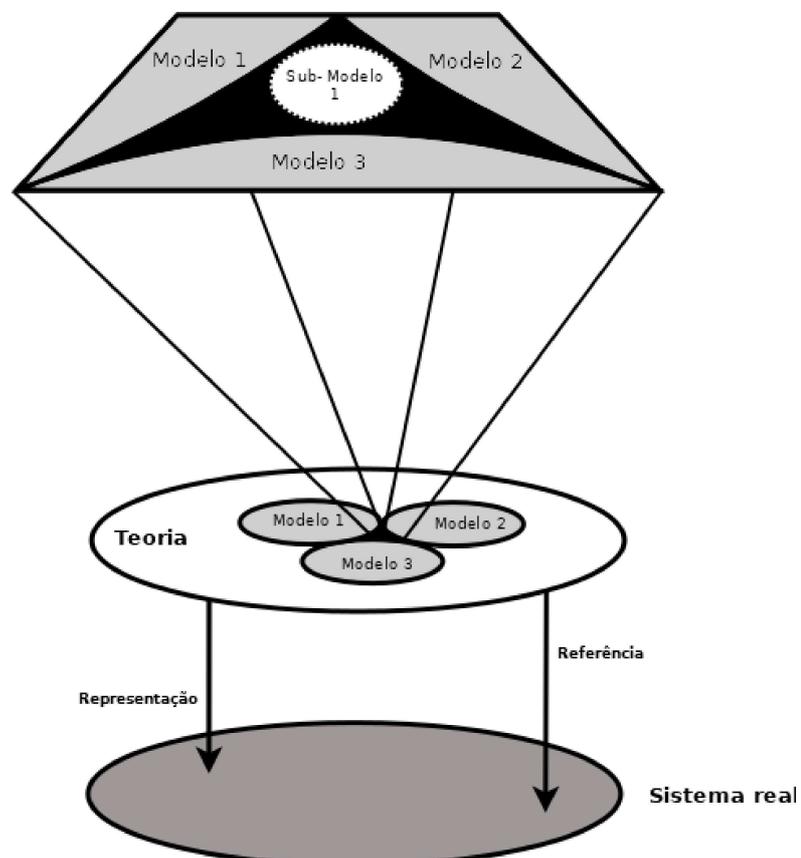
Dessa maneira, se torna evidente a incapacidade de um único modelo explicar a totalidade de uma Teoria em face a um Sistema real (Mundo real). Em prol de qualquer teoria, seria substancialmente necessária a integração de diversos modelos com maior ou menor grau de generalização capazes de ocupar as lacunas deixadas pelos modelos “maiores” (Figura 2) na tentativa de chegar o mais próximo da explicação do Sistema real.

Figura 1 - Esquema representativo de como as teorias e modelos trabalham em explicar o real



Fonte: Camarena, (2002)

Figura 2 - Esquema representativo de como as lacunas entre dois modelos que explicam uma teoria, podem ser ocupados por outro modelo menor.



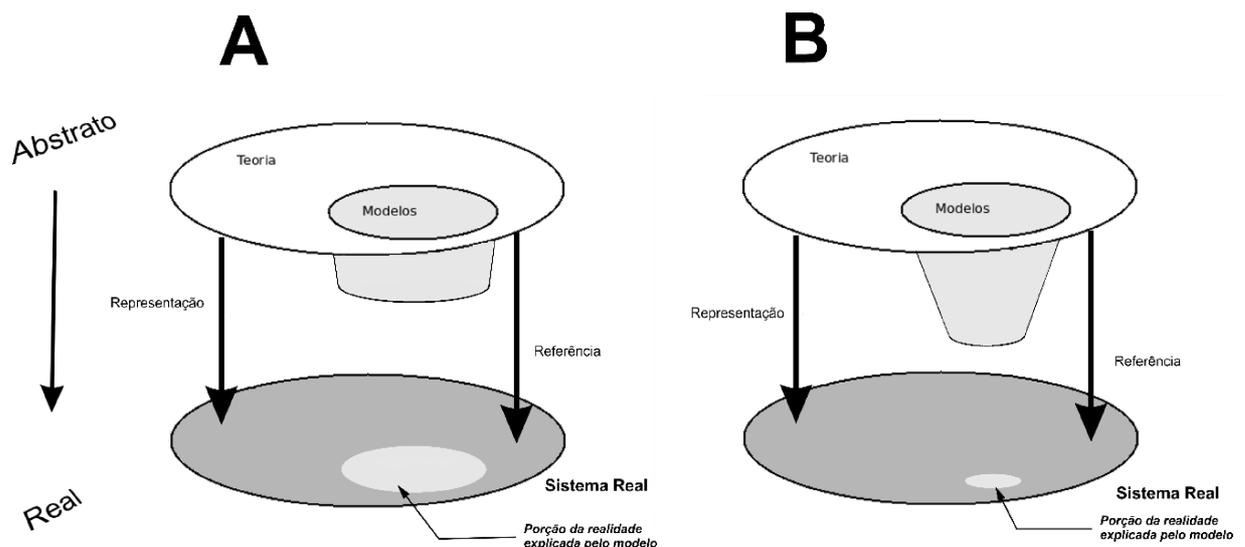
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.2.1.1 Os tipos de modelos

Se resgatarmos as colocações anteriores sobre os modelos, como ferramentas para auxiliar a comprovação das teorias, é possível compreender que ocorre uma ponte (os modelos), entre o abstrato (as teorias) e o concreto (Sistema real/ mundo real). Quanto a essa funcionalidade, as colocações de Harvey (1983), Chorley e Haggett (1974, 1975), e Camarena (2002), demonstram também que um único modelo não abarca a totalidade dos postulados de uma teoria, mas a auxilia em seu processo explicativo no entendimento do mundo real (figura 2).

Destarte, é possível concluir que ora os modelos podem ser mais, ora menos abstratos, de acordo com o seu objetivo. Aqueles operacionais, os mais próximos possíveis do concreto, acabam pagando o preço de se resumirem a uma lente metodológica com uma objetiva de “grade angular” muito estreita, o que limita a sua visão do todo, mas, apesar disso, são os mais adequados para estudos de caso. Em contrapartida, aqueles modelos mais abstratos possuem um amplo grau de generalização e possibilitam uma “lente de maior grade angular” e uma visão mais clara do todo (figura 3), e, por conta disso, são indicados para a formulação de explicações mais gerais sobre o funcionamento do mundo, e/ou universo e da própria sociedade.

Figura 3 - Esquema teórico da comparação dos modelos como uma lente, ora mais próxima da realidade (modelos concretos) outrora mais distantes (modelos teóricos)



Fonte: Adaptado de Camarena (2002)

De maneira mais prática, é possível tomar como exemplo na Geografia as análises de movimentos de massa. Em uma perspectiva teórica extremamente ampla, tais eventos são

regidos pela Teoria da Relatividade Geral e pautadas nas Leis de Gravitação Universal de Newton. Contudo, tais perspectivas perfilam considerável abstração, de modo que necessitam de modelos menores, mais pragmáticos e concretos, se o objetivo real for tentar analisar apenas os movimentos de massa em uma determinada face de vertente.

Nessa relação entre o real ao abstrato, existem características inerentes e comuns a todos os modelos, para que determinadas formulações, antes de serem consideradas como um modelo, precisam de atendê-las.

Compreendendo tal realidade, Vieira e Martins (2016) resgatam uma reflexão sobre as cinco principais características inerentes a todos os modelos, que são a: **Seletividade, Estruturação, Reaplicação, Simplicidade, o caráter Sugestivo, e Análogo.**

A **seletividade** está estreitamente ligada à faculdade do pesquisador de selecionar as variáveis mais significativas do universo analisado. Esses aspectos selecionados passam a compor a chamada **estruturação** do modelo, visto que serão analisados de acordo com suas conexões, interferindo justamente no arranjo da sua própria construção.

A **reaplicação**, por seu turno, se refere ao fato de os modelos precisarem ter a capacidade explicativa para mais de uma área propriamente dita, conforme seu grau de generalização, a fim de diferenciá-los de simples estudos de caso.

Esse grau de generalização, por sua vez, vai determinar e ser determinado pela capacidade de emprego da **simplicidade** e da elegância na elaboração do modelo, para explicar determinado fenômeno. Este princípio se justifica porque de modo geral os modelos “devem ser fáceis de manipular e compreender, mas sem prejudicar a complexidade necessária para representar o sistema estudado” (VIEIRA; MARTINS, 2016, p. 196).

Já o caráter **sugestivo** dos modelos fundamenta o entendimento de que um modelo é mais complexo do que a simples divisão ou soma de suas partes. É independente do conhecimento total, parcial ou nulo das interações dos componentes que formam as variáveis no interior do modelo (modelos de caixa branca, caixa cinza ou caixa preta) (VIEIRA; MARTINS, 2016), o seu resultado final é sempre mais complexo do que a simples equação das variáveis de entrada.

A sua condição **análoga**, enfim, é aquela característica dos modelos que vai salientar as limitações da abordagem de tal perspectiva de análise. Assim, sustenta-se que mesmo compreendido (o modelo) como algo diferente do mundo real, por possuir um grau de generalização e conseqüentemente de erro em sua construção, em teoria, é o meio mais próximo e puro possível de se representar e/ou explicar a realidade.

Além destas características indissociáveis a todos os modelos, existem ainda aqueles conjuntos de atributos únicos de cada grupo, referentes à sua forma de explicação do real, que

vão gerar tipos diferentes de modelos. Cientes de tais características singulares que os modelos podem dispor, Rocha e Salvi (2017), por sua vez, promovem uma releitura da classificação dos seus tipos de acordo com suas características particulares. Então, os autores vão dividi-los em **científicos**, **didáticos** e **mentais**, os quais são sub-classificados posteriormente de acordo com suas demais características ainda mais particulares dentro dos subgrupos (Figura 4).

Figura 4 - Síntese da tipologia e classificação dos modelos científicos e não científicos

TIPOLOGIA	CLASSIFICAÇÃO	FUNÇÃO - COMPOSIÇÃO	EXEMPLOS
MODELOS MENTAIS	CRIATIVOS	São responsáveis pela representação de objetos ou situações da realidade ou do cotidiano das pessoas ou não	ideias, objetos mentais
	INDICATIVOS	Favorecem um padrão de comportamento e de deslocamento humano e espacial por meio da representação simbólica	Sinais de localização, de trânsito, sinais de segurança
	ARQUÉTIPOS	Atribuem conteúdo imagístico e simbólico do inconsciente coletivo, compartilhado por toda a humanidade	Modelo de cidadão, de pessoa, de pai
MODELOS DIDÁTICOS	ICÔNICOS	São responsáveis pela representação de objetos ou situações da realidade ou do cotidiano das pessoas ou não	Globo Terrestre, Mapas Temáticos
	ESCALARES	Usam os mesmos materiais e/ou paisagens da realidade.	Dobramentos Tectônicos, formações rochosas específicas
	ANÁLOGOS	São responsáveis pela representação de objetos ou situações da realidade ou do cotidiano das pessoas ou não	Maquete de uma barragem, ou um desenho de um Vulcão
MODELOS CIENTÍFICOS	MATEMÁTICOS OU SISTÊMICOS	Representados por símbolos, funções matemáticas ou representações cartográficas	Estatísticas, Mapas temáticos, Teoria de Malthus
		Organizacionais	Teoria de Lugares Centrais Christaller, Von Thunen
		Preditivos/Probabilísticos - simulando processos físicos e humanos, nos quais não há certeza do efeitos de determinada causa.	Previsão do tempo e evolução climática.
	CONCEITUAIS OU TEÓRICOS	Descritivos/Determinísticos - representam processos reais de causa e efeito. Buscam testar processos físicos ou oferecer normas de comportamento humano passíveis de comparação.	Evolução urbana, uso do solo Teoria de Malthus, Modelos de Regressão.
		Podem construir paradgmas para a Geografia	Evolução do Pensamento Geográfico: Geografia Teorética, Geografia Crítica, etc.
		Podem auxiliar na formação de tipos de explicação	Marxismo, Liberalismo, Anarquismo, etc

Fonte: Rocha e Salvi (2017)

Os modelos **mentais** são os que a mente cria instantaneamente ao ser estimulada por algum de seus sentidos. Um bom exemplo é quando pedimos para um ser humano imaginar um

pássaro, caso já tenha visto algum. O sujeito construirá automaticamente um modelo geral de um pássaro em sua mente.

Já os **didáticos** vão agrupar aquelas ferramentas que representam, mais concretamente, processos ou a forma de um objeto real, que é utilizado para demonstrar de forma simplificada e abstrata algum fenômeno real. Estes vêm com o intuito de facilitar a aprendizagem e se encontram no contexto da Geografia as maquetes, miniaturas, plantas, entre outros.

Esses dois primeiros tipos de modelos apresentados até então são considerados como **não científicos**, ou seja, quando são apenas “cópias despreziosas da realidade como miniaturas de objetos reais ou imaginários, como representações tridimensionais de barcos, bonecos, pinturas em quadros, ou como modelo do tipo arquétipo que se busca imitar, como no caso de pai e filho” (ROCHA; SALVI, 2017, p. 151–152).

Todavia, aqueles modelos classificados **como científicos** vão trabalhar no intuito de buscar maneiras de explicar o mundo através da simplificação e abstração de forma mais complexa e elegante. Desse modo, são subdivididos em *Matemáticos/Sistemáticos* ou *Explicativos/Teóricos*.

Aqueles modelos tidos como *Matemáticos/Sistemáticos* vão se configurar mais pragmáticos e mais próximos do real (Figura 3). Estes atuam na tentativa de se explicar o funcionamento de apenas uma porção da realidade empiricamente mais concreta, valendo-se principalmente da matemática e da estatística para provar suas análises e prever comportamentos.

Enquanto isso, os *Explicativos/Teóricos* vão ocupar-se de auxiliar a explicação de grandes teorias a partir de formulações lógico-rationais sobre a realidade, tornando-se, em razão disso, mais generalistas e abstratos, já que trabalham com variáveis e eventos que são empiricamente mais complexos de serem comprovados (Figura 3). Normalmente, tais modelos se valem de postulados universais com vistas a embasar suas formulações.

No entanto, existem diversas formas de organizar e classificar os tipos de modelos, e vários são os autores que já trabalharam nas tentativas de classificar e agrupá-los quanto à sua tipologia. Na Geografia destacam-se os nomes de Haggett e Chorley (1974, 1975); Harvey (1983); Christofolletti (CHRISTOFOLLETTI, 2007) .

Cumprir dizer que não ocorre um consenso geral na Geografia quanto à correta classificação da sua tipologia, devido à versatilidade da abordagem por meio dos modelos. Antes de propor a sua própria classificação Chorley e Haggett salientam essa realidade em que “O termo modelo tem sido usado numa variedade tão grande de contextos que é difícil até

definir os tipos gerais de uso, sem que haja ambiguidade.” (CHORLEY; HAGGETT, 1975, p. 6).

Desta forma, por mais que existam diversas classificações sobre a tipologia dos modelos, no final, cabe ao pesquisador, através do senso crítico que a pesquisa impõe, optar pela classificação tipológica mais adequada aos seus objetivos e ao seu próprio objeto de pesquisa. Sendo aqui expressa aquelas considerações e classificações que foram qualificadas como mais apropriadas ao escopo da pesquisa e pesquisador.

3.2.2 Modelos na Geografia Brasileira

No contexto da Geografia brasileira, a definição mais usada para os modelos corrobora a sua visão como uma possibilidade de simplificação da realidade para seu entendimento. Conforme Christofolletti:

A palavra modelo possui muitas nuances em seu significado. De modo geral pode ser compreendido como sendo “qualquer representação simplificada da realidade” ou de um aspecto do mundo real que surja como de interesse ao pesquisador, que possibilite reconstruir a realidade, prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução (CHRISTOFOLLETTI, 2007)

Tal autor ainda advoga sobre as considerações de Chorley e Haggett (1975) sobre a ótica de análise do mundo a partir desta concepção teórica. Estes voltam a destacar o caráter do modelo como uma simplificação da realidade, mas alertando que toda a construção da realidade tem um caráter singular da subjetividade envolvida.

Esse subjetivismo dos modelos se dá principalmente devido ao fato destes não serem capazes de abarcar toda a realidade das observações analisadas, cabendo ao pesquisador selecionar as informações a serem trabalhadas, como já destacado anteriormente.

Todavia, o que se mostra como uma falha para alguns, para outros, é a maior potencialidade dos modelos em si. Nessa segunda perspectiva, justamente por não abraçarem a totalidade, os modelos são capazes de eliminar aspectos acidentais e focar apenas os principais fatores que compõem a construção da dinâmica na realidade observada (CHORLEY; HAGGETT, 1974).

Rocha e Salvi (2017), a partir de um olhar contemporâneo sobre os modelos no âmbito da Geografia brasileira, promovem uma tentativa de debate teórico e histórico sobre seu uso e a função na análise geográfica, que tem sido relegada por parte da Geografia desde o final da década de 1970. Ambos os autores defendem que atualmente tais estudos se tornam extremamente

necessários e sensíveis à Geografia em âmbito nacional. Isso pois, com a chegada da escola Crítica na década de 1980, ocorreu um equivocado abandono e até mesmo demérito dos modelos por expressiva parte dos geógrafos pelo país da linha mais radical.

Esse reducionismo é fruto principalmente de uma falha na compreensão e apreensão teórica da concepção dos modelos, bem como de sua relação com a “Geografia Teorético-Quantitativa”, visto que ambas passaram a ser tratadas erroneamente como sinônimos. Assim, na tentativa de superação do paradigma matemático da Geografia, os modelos foram “jogados fora com a água do banho”, e atualmente observa-se que isso veio a custar muito caro à Geografia.

Para melhor compreender o movimento de renúncia a essa abordagem, é necessário observar o próprio processo de mudança pelo qual a Geografia Brasileira passava entre o final da década de 1970 e o início de 1980. Isso pode ser assinalado principalmente através da análise das próprias disputas que ocorreram dentro da Associação dos Geógrafos Brasileiros, a qual, no período em questão, era o principal palco da Geografia no país.

Esse período foi marcado por uma forte disputa entres dois grandes grupos de Geógrafos, os críticos, de linha marxista e os quantitativos, com uma abordagem mais anglo-saxônica. Ainda existiam, no meio dessa disputa, diversos grupos menores que não se identificavam inteiramente com nenhuma das duas principais abordagens (ANDRADE, 1991). O resultado dessa disputa foi a consolidação do processo de rompimento do paradigma teórico quantitativo na Geografia, o qual foi substituído pela concepção Crítica, de modo que a linha marxista é a dominante nos círculos acadêmicos contemporâneos.

Contudo, esse processo de rompimento das concepções teórico quantitativas não respeitou às três regras básicas propostas por Chorley e Haggett (1974, 1975) para o seu sucesso de ascensão como paradigma científico dominante. Isso desencadeou o desenvolvimento de concepções teóricas e metodológicas equivocadas de leitura do fazer científico, como o próprio abandono quase completo da ótica dos modelos pela Geografia.

Precisamente, os dois primeiros critérios foram satisfeitos com certo êxito, porém, o terceiro não foi alcançado completamente. O primeiro fator para o sucesso é que o novo paradigma que se impõe (o da Geografia Crítica) deve, em teoria, ter a capacidade de explicar os fatos que o seu predecessor não foi capaz de esgotar, encaminhando-se, portanto, à crise (CHORLEY; HAGGETT, 1974, 1975). Quanto a isso, a Geografia Crítica (não apenas a marxista) cumpriu um importante papel ao promover uma abordagem geográfica mais ativa e participativa nas diversas esferas sociais do país, respondendo, assim, a uma crítica dos

geógrafos do período, que não viam uma aplicabilidade de seus trabalhos na solução dos problemas que atingiam a sociedade.

O segundo pressuposto para a ascensão de um novo paradigma defende que este tenha capacidade de expansão e de difusão maiores do que o anterior. Essa é uma das características cruciais de todo novo pensamento em desenvolvimento, visto que a capacidade de se expandir, de ser aceita e absorvida por novos pesquisadores (CHORLEY; HAGGETT, 1974, 1975) é, na verdade, um jogo de “sorte”. Em síntese, é preciso que a comunidade científica acredite, já em um primeiro momento, que a nova abordagem seja superior e mais correta do que a anterior, o que só será comprovado (teórica ou empiricamente) pelos novos estudos a serem empregados pela nova perspectiva. Nesse sentido, a Geografia Crítica foi bem recebida pelos geógrafos brasileiros.

Em razão do próprio processo político que se desenrolava no país, de anseios democráticos, por liberdade política, como um dos fatores a possibilitarem a adoção do novo paradigma. Todos esses anseios geravam uma grande cobrança, entre os geógrafos, por um caráter mais ativo no processo de construção da sociedade, algo que a Geografia Crítica propunha e defendia, atendendo, assim, às demandas da época no que concerne aos profissionais da área.

Entretanto, como citado anteriormente, o terceiro pré-requisito para ascensão completa do paradigma não foi alcançado. A terceira condição preconiza que a nova abordagem seja mais elegante e simples na sua forma de compreender o mundo e explique com maior clareza a realidade que a cerca (CHORLEY; HAGGETT, 1974, 1975), aproveitando as bases deixadas pelas perspectivas anteriores.

De certo modo, a Geografia Crítica conseguiu estabelecer uma resposta satisfatória a esse último ponto com relação aos geógrafos dentro das áreas de humanidades, mas no campo das ciências naturais teve mais dificuldades. Houve até mesmo tentativas, por parte de alguns grupos mais radicais, principalmente pertencentes às correntes marxistas mais dogmáticas, de abandono à Cartografia e a qualquer perspectiva de análise que fugisse das suas crenças. Compreende-se essas defesas ao levarmos em consideração a existência de uma “linha marxista ortodoxa, que procura aplicar o pensamento marxista como um dogma à análise da realidade geográfica e linha marxista moderna, que utiliza os métodos marxistas sem aceitar a existência de uma doutrina, quase religiosa, marxista.” (ANDRADE, 1991, p. 151).

Nesta disputa geral entre Geógrafos teóricos quantitativos, críticos marxistas (ortodoxos ou moderados) e ainda aquelas linhas ainda críticas voltadas a Geografia cultural, fenomenológicas, entres outras, pode-se dizer que as concepções marxistas, no geral, foram as

vitoriosas. Assim, passou-se a compreender que fazer Geografia era fazer Geografia Crítica e que fazer Geografia Crítica por muito tempo se tornou sinônimo de fazer uma Geografia Marxista.

Entretanto, atualmente, diversos autores colocam em xeque essa concepção, haja vista que buscam oxigenar outras perspectivas de análise, pois passou-se a entender que na Geografia “o marxista é essencialmente crítico, mas nem todo crítico é essencialmente marxista”⁶ (SILVA, 2004, p. 8) dando espaço para outras abordagens.

Obstante a essa realidade, passados trinta anos com o furor da Geografia Crítica assentada, os geógrafos perceberam que abrir mão de alguns dos métodos de apreensão da realidade utilizados pelas “antigas e novas” Geografias custou caro para as análises geográficas. Essa percepção vem fomentando um movimento de retorno a outros métodos reflexivos em todas as escolas geográficas, mesmo naquelas assentadas na Geografia Crítica marxista, como é o caso das reflexões pela ótica dos modelos:

Apenas mais recentemente foi possível perceber um retorno do interesse acerca dessas questões por alguns poucos estudiosos e, geralmente, em torno de temas ligados aos modelos científicos. A maioria dessas publicações tem caráter de ciência aplicada, pois estão vinculadas a estudos de urbanização e uso do solo, ou estudos que trabalham com previsões sobre o clima passado, atual e remoto. A retomada dessas questões pode ser visualizada dentro de um movimento intelectual internacional, ainda no contexto da geografia crítica [...] (ROCHA; SALVI, 2017, p. 148)

Com efeito, não é possível dizer que o abandono da perspectiva dos modelos e da cartografia foi unânime na Geografia ao longo destes 30 anos. Muito pelo contrário, algumas áreas da própria Geografia obtiveram grandes avanços ao longo desse período. A Cartografia, por exemplo, sofreu nos anos iniciais da ascensão do paradigma crítico, mas ressurgiu com força na década de 1990.

Em síntese, a partir das várias dimensões tratadas, o balanço feito por Rosely Archela sobre a Cartografia brasileira é otimista e destaca que se na época da Geografia crítica a Cartografia foi “abandonada”, ela ressurge, nos anos 1990, por causa das novas tecnologias, o que para ela se explica por que no período da globalização há uma exigência para uma Cartografia de “qualidade tecnológica” no interior da Geografia e a Geografia não poderia ficar fora disso (2000, p. 158). Isso é demonstrado com a quantidade de eventos sobre sensoriamento remoto, Cartografia digital e SIG. (FONSECA, 2004, p. 58)

Isso se deve principalmente às contribuições que ocorreram ainda na década de 1980 pela inserção do Geoprocessamento na Geografia brasileira, através do professor Jorge Xavier-Da-Silva. Tal iniciativa se configurou como um importante estímulo para o avanço das análises

⁶ Trecho do prefácio do livro *Do senso-comum à Geografia Científica* de Lenyra Rique da Silva, escrito por Manuel Correia de Andrade.

sobre a ótica de modelos na análise ambiental voltada à Geografia Física brasileira, as quais serão expressas mais à frente. Mas já é possível, inclusive, adiantar que tais esforços foram capazes de inspirar toda uma geração de geógrafos brasileiros que residem no “Panteão” da história da Geografia brasileira.

Diante disso, Fernandes (2016) destaca ainda como a modelagem e, conseqüentemente, os modelos aplicados na Geografia Física brasileira, sempre assumiram uma perspectiva crítica sobre a sua atuação na ciência. Esse fato deve ser considerado em oposição à ideia da Geografia Crítica segundo a qual uso dessa ferramenta faria parte de um processo de alienação e de esvaziamento do caráter reflexivo e crítico do fazer geográfico.

Paralelamente, nas últimas décadas diversos textos têm buscado uma discussão mais crítica sobre a ferramenta modelagem (por ex., Haines-Young e Petch, 1986; Bauer et al., 1999; Wolman, 2004; Inkpen, 2005; Blue e Brierley, 2016). Portanto, vale aqui uma reflexão sobre como a ferramenta modelagem vem sendo utilizada na geografia física, discutindo suas bases teóricas, principais potencialidades de aplicação e suas limitações (FERNANDES, 2016, p. 210)

Dessa forma, é possível concluir que, embora a perspectiva dos modelos na Geografia brasileira tenha sido esvaziada por um longo período de tempo, seu abandono não foi uma unanimidade. Além disso, cabe pontuar que foram obtidos consideráveis avanços e contribuições para o desenvolvimento geográfico naqueles grupos de resistência os quais primaram por manter o uso desta perspectiva de análise.

Um terceiro apontamento é que, na atualidade, com as marcas de insuficiência do paradigma que se impôs na capacidade de explicar a emergência de relações cada vez mais complexas, a Geografia tem se dedicado à busca por respostas na releitura de sua própria abordagem visitando novas e antigas perspectivas de abordagens e análise do espaço como a modelagem, estatística, *Data Science*, programação e as já consagradas geotecnologias.

Porém, como o paradigma hegemônico tentará se ajustar a fim de se manter como linha teórica dominante, é evidente que as propostas que se divirjam da linha de pensamento central e que ameacem a sua posição, recebam críticas e a sejam até mesmo invalidadas por pesquisadores mais experientes e prestigiados, que tem seus trabalhos fundamentados sobre essa perspectiva teórica ainda predominante.

Mas é papel dos jovens pesquisadores contestar essa realidade, em um exercício filosófico que é natural para as novas mentes pensantes quando introduzidas em um ramo do saber científico. Pois são esses jovens pesquisadores, que já estão habituados com o processo de construção do conhecimento por meio da ciência “normal”, marcada pela orientação do paradigma dominante, mas ainda sem os vícios e automatismos desta perspectiva os mais

capazes de encontrar falhas e propor soluções para contradições novas e/ou antigas de um determinado campo do saber, isso porque:

Quase sempre, os homens que fazem essas invenções fundamentais são muito jovens ou estão há pouco tempo na área de estudos cujo paradigma modificam¹⁵. Talvez não fosse necessário fazer essa observação, visto que tais homens, sendo pouco comprometidos com as regras tradicionais da ciência normal em razão de sua limitada prática científica anterior, têm grandes probabilidades de perceber que tais regras não mais definem alternativas viáveis e de conceber um outro conjunto que possa substituí-las.(KUHN, 2017, p. 112)

Neste sentido, é possível abordagens como a presente nesta dissertação (baseada em modelos, estatística e processamento de dados) em certos círculos mais tradicionais da Geografia brasileira, seja questionado o seu caráter geográfico e tecnicista. Críticas válidas, normalmente norteadas sobre um passado recente, no qual ocorreu do uso excessivo de tais ferramentas e gerou sérios problemas para a análise geográfica brasileira.

Porém, em ambos os casos (do uso excessivo de tais técnicas e/ou do desconhecimento das suas potencialidades e limitações) não são fatores presente no caráter desta pesquisa. Pois na realidade, ocorre a busca de apresentar um “caminho do meio” neste cenário que se coloca, onde trabalhos geográficos com um alto grau técnico (usando matemática, estatística etc.), não obrigatoriamente deixam de possuir uma reflexão teórica e crítica do fazer geográfico e os reflexos de suas pesquisas e resultados na sociedade.

3.2.3 Os Modelos Digitais de Elevação

Os modelos digitais de elevação são uma representação tridimensional de uma determinada superfície, a qual, na realidade, pode ser descrita matematicamente como uma matriz, onde, cada uma das células possui um valor altimétrico de um ponto na superfície de um corpo celeste qualquer.

Li, Zhu e Gold (2004) relatam que a primeira aplicação registrada de um Modelo Digital do Terreno ocorreu em 1958 por Miller e Laflamme, após as colocações teóricas ocorridas um ano antes por Robert sobre a possibilidade de serem gerados modelos digitais do relevo para o planejamento de rodovias:

The first application of DTM is in civil engineering, more precisely, highway engineering. In 1957, Roberts (1957) proposed the use of DTMs for highway design. One year later, Miller and Laflamme (1958) used the data to set up a cross-section (profile) model and coined the concept of DTMs for the first time. Thereafter, Roberts and his colleagues at MIT developed the first terrain modeling system. This system could not only interpolate in the sections

(profiles), but also calculate the cut-andfill between sections and provide useful data for engineering design.(LI; ZHU; GOLD, 2004, p. 285)

Contudo, passados mais de 60 anos, somados ao veloz desenvolvimento da ciência da computação, os números de ferramentas, técnicas e metodologias para a criação de Modelos Tridimensionais do Terreno se ampliaram. Isso acabou gerando um debate acerca da nomenclatura e dos tipos de informações presentes em cada material, levando-se em consideração o método de levantamento, o tipo e forma como a informação é apresentada, entre outros aspectos.

Dessa maneira, não ocorre uma padronização dos termos usados para designar essas representações tridimensionais da superfície terrestre, as quais variam conforme a nacionalidade de origem do produto, já que cada país denomina à sua própria maneira.

Alguns dos termos encontrados para denominar esses materiais são: Modelo Digital de Elevação (MDE); Modelo Digital de Altura (MDA); Modelo Digital de Superfície (MDS); Dados de Elevação Digital do Terreno (DEDT); Modelo Digital de Terreno (MDT); entre outros (LI; ZHU; GOLD, 2004).

Ao desenvolverem um estudo sobre a etimologia dos termos em sensoriamento remoto, Hasmann, Camargo e Orenha-Ottaiano realizaram um comparativo entre os vocábulos internacionais e as traduções e transliterações aplicadas nos materiais brasileiros, concluindo que:

O sensoriamento remoto é uma área predominantemente desenvolvida no exterior. Países como Estados Unidos, China, Alemanha e Rússia, por exemplo, têm avançados centros de pesquisa e desenvolvimento dessas técnicas para serem aplicadas em prol do bem-estar e defesa do ser humano. No Brasil, por ser um país onde esta disciplina é considerada emergente, a fixidez lexical ainda se encontra no início. Para Pavel (2003), a maioria dos grupos fixos de palavras deriva das disciplinas-mãe, além disso, notamos não haver uma padronização em suas utilizações. Em razão dessa não padronização, este artigo teve como objetivo mostrar as dificuldades que tradutores ou alunos podem encontrar ao ter de lidar com acrônimos e siglas na área de sensoriamento remoto.(HASMANN; CAMARGO; ORENHA-OTTAIANO, 2014, p. 45).

Observada essa realidade, pretende-se então expor os termos e definições usadas ao longo desta dissertação, para evitar polissemias quanto à discussão proposta. Para tanto, cumpre fazê-lo com base na visita a autores que já se debruçaram sobre a discussão teórica e prática do Sensoriamento Remoto dentro da temática dos modelos tridimensionais da superfície da Terra.

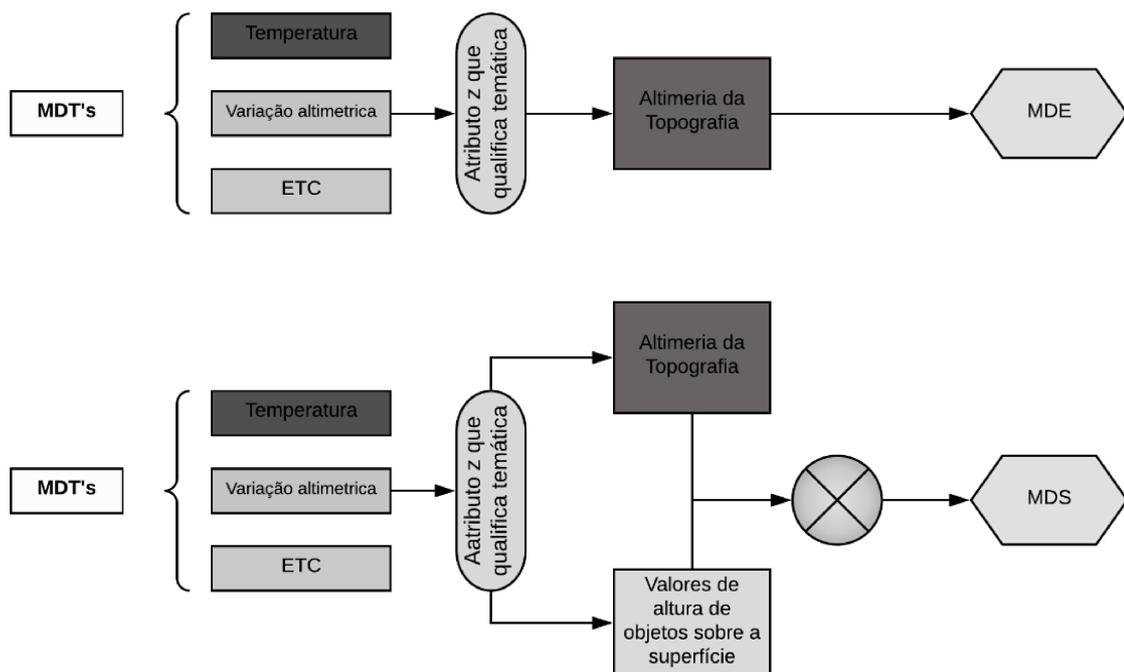
O termo Modelo Digital do Terreno (MDT) é usado para qualificar qualquer conjunto de dados distribuídos em uma matriz com uma posição determinada a partir de um referencial espacial (coordenadas) e um atributo z que qualifica a temática. Assim, “Pode-se modelar valores de altura (relevo), profundidade (batimetria), temperatura, teor de um elemento

químico, ou qualquer outro fenômeno associado a cada posição espacial da área de interesse” (FELGUEIRAS; URASHIMA; SOARES, 1989).

Os Modelos Digitais de Superfície (MDS) passam a ser os responsáveis por modelarem a superfície terrestre. Estes modelos realizam a integração tanto da superfície topográfica do terreno como das estruturas que estão sobre ele, como casas; árvores; carros; entre outros aspectos (VIANA, 2017).

Ainda neste escopo de representações tridimensionais da superfície do planeta, se encontram os Modelos Digitais de Elevação (MDE), em verdade, bastante semelhantes aos MDS. Contudo, os MDE possuem a particularidade de não registrarem os corpos que residem sobre a superfície terrestre, computando somente a topografia e as formas do relevo (LI; ZHU; GOLD, 2004). Compreendendo-se então o fato de que todos os MDS e MDE sejam um MDT, e nem todos os MDT serão necessariamente um MDE ou MDS (Figura 5).

Figura 5 - Esquema simplificado da diferença conceitual entre MDT, MDS e MDE



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.2.3.1 Modelos regulares e de grade triangular

Quanto à geração de Modelos Tridimensionais do Terreno, são realizados a partir de pontos com os valores altimétricos, formando o que se chama em sensoriamento remoto de

nuvem de pontos. Essas nuvens de pontos amostrais podem ser distribuídas de forma sistemática ou aleatória, sendo que as sistemáticas especificamente ainda podem ter diversas formas geométricas (quadradas, triangulares, pentagonais, hexagonais, etc.), as quais interferem diretamente na representação final do relevo feita pelo MDE.

3.2.3.1.1 Modelos de Grade regular

No que compete aos modelos de grade regular, Rocha (2019) os define como matrizes em que cada elemento a_{ij} está vinculado a um valor altimétrico. Tais modelos são normalmente gerados a partir de interpoladores matemáticos que passam a estimar os valores das células sem informação a partir dos seus vizinhos ou ainda da média geral dos dados:

As grades regulares são representações matriciais onde cada elemento da matriz se encontra associado a um valor numérico. Em sua geração são usados interpoladores matemáticos, a partir de um conjunto de pontos originais, para estimar os valores para as células que não possuem elevação, considerando-se os pontos vizinhos (ROCHA, 2019, p. 172)

A maioria dos MDT vão adotar esse tipo de malha de pontos regular, principalmente por seu baixo custo, facilidade e rapidez na sua identificação por algoritmos computacionais e de análise espacial (SANTOS et al., 2008). Porém, ocorre uma deficiência nos modelos regulares para a representação de superfícies topográficas, devido à dificuldade destes interpoladores em representarem as discontinuidades no espaço Geográfico:

(...) a malha regular não é adequada para representar a topografia, pela dificuldade em representar discontinuidades naturais (divisores de água, canais, falhas geológicas e lagos) e artificiais (reservatórios, prédios e taludes de rodovias) do terreno. São mais apropriadas para modelos de terreno da terra desnuda, nos quais não existam discontinuidades naturais. (SANTOS et al., 2008, p. 98)

Essa particularidade dos modelos de grade regular também foi salientada por Matos, que sustenta, como Santos, que “este tipo de malha pode não ser adequado para representar objetos artificiais como estradas, edifícios etc., sendo mais apropriado para modelos de terreno da terra desnuda, em que não existam discontinuidades naturais” (MATOS, 2005, p. 66).

3.2.3.1.1 Modelos de Grade triangular

Já os modelos de grade triangular criam triângulos usando como vértices a nuvem de pontos amostrais, formando assim triângulos únicos não sobrepostos, os quais vão cobrir toda a área amostral. Contudo, quanto mais irregular o terreno, para a resolução do MDE ser factível

com a realidade do terreno, é necessário que se obtenha mais pontos de referência (MATOS, 2005).

Mas a sua superioridade para a representação dos relevos frente aos modelos de grade regular na geração de MDE reside na sua capacidade de absorver as diversas discontinuidades do relevo:

Este tipo de malha tem sido muito empregado nos programas de MDT, principalmente por facilitar a incorporação de discontinuidades do terreno como linhas de estrutura (talwegues, e cumeadas), *breaklines*, áreas mortas (lagos, platôs sem variação de nível). (ROCHA, 2019, p. 173)

Desse modo, passa-se a compreender uma problemática na escolha por uma ou por outra metodologia de grades na formulação dos MDE. Por um lado, as grades triangulares representam melhor o relevo, pois são capazes de absorver as discontinuidades do terreno. Por outro, as grades regulares são mais facilmente analisadas e trabalhadas, sendo até mesmo mais baratas, tendo em vista que quanto mais complexo o relevo, maior a necessidade de pontos amostrais nos modelos de grades triangulares.

Conseqüentemente, a escolha por um ou outro tipo de grade no tratamento, formulação e geração dos modelos digitais de elevação precisa equacionar todo um planejamento de dimensão de custos e conhecimento geral da área, além dos objetivos futuros do emprego dos MDE gerados naquela área.

3.2.3.2 *Interpolação e interpoladores*

Independentemente do tipo de grade a ser utilizada (regular ou triangular), posteriormente, tanto uma quanto a outra necessitarão de uma técnica de interpolação matemática para serem capazes de modelar a superfície levantada.

Embora todas as técnicas de interpolação partam da premissa de que pontos mais próximos tendem a apresentar características semelhantes às daqueles mais distantes (MATOS, 2005), os diferentes métodos de interpolação vão se diferenciar tanto na sua classificação quanto na sua função.

Matos (2005) propõe uma classificação da tipologia dos modelos de interpolação semelhante às colocações anteriores de Rocha e Salvi (2017) sobre classificação e tipologia de modelos, porém adaptada mais especificamente aos de interpolação (Tabela 1).

Partindo-se dessa tipologia, vê-se que o IDW (Inverso da Potência das Distâncias), a Krigagem (e suas variações), o Spline e, por fim, o método de Vizinho Natural na geração de

MDE vão emitir resultados diferentes devido à característica da técnica interpoladora e também devido às funções matemáticas empregadas.

Tabela 1 - Tipologia dos modelos de métodos de interpolação, suas características e funções aplicadas.

Interpoladores	Características	Funções
Determinísticos	Esses métodos têm como característica básica a utilização dos valores ao redor e/ou fórmulas matemáticas.	<ul style="list-style-type: none"> - Triangulação de Delaunay - Vizinho natural - Superfície de mínima curvatura (Spline)
Probabilísticos	Vão basicamente tentar determinar a correlação dos valores amostrais em relação a distância e direção	<ul style="list-style-type: none"> - Superfície de tendência - Série de Fourier - Superfície de mínima curvatura (Spline) - Krigagem
Locais Globais	Os métodos Locais ou Globais, para promover o processo de interpolação levam em consideração toda a população amostral. Passam a rodar repetidamente os algoritmos para diversos recortes amostrais e para toda a amostra. Porém por utilizarem toda a população, alguma alteração em um valor de entrada altera todos os outros.	<ul style="list-style-type: none"> - Triangulação de Delaunay - Vizinho natural - Superfície de tendência - Série de Fourier - Superfície de mínima curvatura (Spline) - Krigagem
Transição gradual Transição abrupta	“Estes interpoladores produzem superfícies que variam de forma gradual ou abrupta, como o próprio nome já diz” (MATOS, 2005, p.67)	<ul style="list-style-type: none"> - Triangulação de Delaunay - Vizinho natural - Superfície de tendência - Série de Fourier - Superfície de mínima curvatura (Spline)
Exatos	Os modelos exatos vão respeitar de toda forma os valores máximos e mínimos presentes nas amostras.	<ul style="list-style-type: none"> - Triangulação de Delaunay - Vizinho natural - Superfície de mínima curvatura (Spline) - Krigagem
Aproximados	Aqueles considerados aproximados, acreditam em uma variação global das amostras, com flutuações suaves nas áreas de discrepância maiores entre os valores de duas amostras	<ul style="list-style-type: none"> - Superfície de tendência - Série de Fourier

Fonte: Matos (2005)

Por conta disso, não raramente percebe-se a existência tanto de autores que advogam a utilização de uma técnica de interpolação, quanto de estudiosos que optem por outra. Frente a esse quadro, é necessário ao pesquisador compreender a origem de seus dados, bem como conhecer os desafios, as potencialidades e o funcionamento que tangenciam cada técnica, no intuito de alinhar amostra e objetivos à técnica aplicada, evitando inconsistências no resultado.

Neste sentido, visando tal realidade, foram delineadas as características gerais de cada técnica de interpolação empregada nesta análise.

3.2.3.2.1 KRIGAGEM

Yamamoto e Landim (2013) destacam que as técnicas de Krigagem apresentam enorme potencialidade por não necessitarem de uma distribuição normal dos dados. Tamanha é a sua versatilidade que, caso seja necessário que os dados sigam uma distribuição, tal método oferece ajustes os quais permitem-no ser empregado sem grandes problemas.

Tais autores chegam ainda a sustentar que a Krigagem é o melhor estimador geostático, principalmente pela sua capacidade adaptativa, a qual permite trabalhar com diversos tipos de dados de inúmeras temáticas:

A Krigagem usada para a predição não requer que os dados tenham distribuição normal. Entretanto, a normalidade é necessária para se obter mapas de quantis e de probabilidade na Krigagem ordinária, simples e universal. Considerando apenas a predição criada por médias ponderadas, a Krigagem é considerada o melhor estimador não viciado[...] existem diversos 16 tipos de Krigagem. As mais comuns são a Krigagem simples, a ordinária, a universal, de indicadores, de probabilidade e a disjuntiva. (JAKOB; YOUNG, 2006, p. 15)

Para o seu funcionamento, a Krigagem passa a assumir que a localização, a direção e a distribuição dos pontos refletem uma correlação espacial que serve para explicar e prever variações gerais ao longo de todo o terreno. Childs (2004) estabelece que os valores passam a ser determinados de acordo com um cálculo sofisticado de médias ponderadas em relação às amostras de raios amostrais também pré-determinados. As formas e dimensões destas possíveis variações determinam inúmeros modos da aplicação do método que se adequam melhor ou pior de acordo com a temática abordada.

The predicted values are derived from the measure of relationship in samples using sophisticated weighted average technique. It uses a search radius that can be fixed or variable. The generated cell values can exceed value range of samples, and the surface does not pass through samples. There are several types of Kriging. Ordinary Kriging, the most common method, assumes that there is no constant mean for the data over an area mean (i.e., no trend). Universal Kriging does assume that an overriding trend exists in the data and that it can be modeled. (CHILDS, 2004, p. 34)

A principal diferença entre a Krigagem e as demais técnicas de interpolação se dá pela forma como são distribuídos os valores de pesos entre as amostras. Enquanto alguns interpoladores usam apenas a distância como fator principal, a Krigagem faz uso de média ponderada. Com isso, esta técnica busca estabelecer o pesos a partir de uma análise espacial

pautada em variâncias experimentais no intuito de oferecer como produto final uma representação com a menor variância na média, de forma não tendenciosa (MATOS, 2005).

É possível observar soluções elegantes e bem consistentes da Krigagem em diversas áreas, em razão de seu poder adaptativo frente a essas variâncias experimentais. No entanto, em compensação, tal técnica paga o preço de cobrar muito dos equipamentos de *hardware*, levando em consideração os números de pontos amostrais (n), pode chegar a um custo computacional igual a n^3 para geração de resultados (MATOS, 2005).

3.2.3.2.2 INVERSO DA POTÊNCIA DAS DISTÂNCIAS – IDW

A técnica do Inverso da Potência das Distâncias carrega, em suma, a concepção geral e mais simples da Geoestatística, defendendo que os pontos mais próximos uns dos outros são mais parecidos e com isso desempenham maior influência sobre seus vizinhos do que sobre aqueles mais distantes, resultado de um comportamento linear (Figura 6).

Dessa forma, este interpolador local, considera que pontos mais próximos têm valores similares e possuem maior influência sobre o valor a ser interpolado, enquanto que pontos mais distantes são independentes e não exercem influência no resultado. (MIRANDA et al., 2018, p. 235)

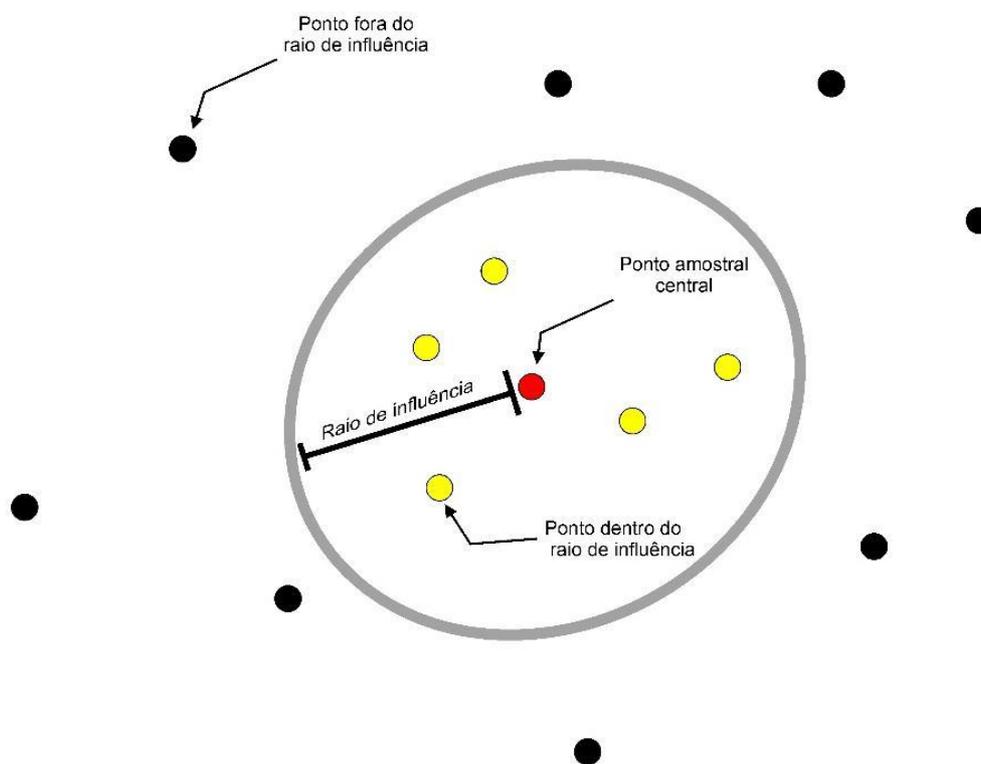
Para que esse método tenha eficácia, é necessário ter uma nuvem de pontos amostrais densa o bastante para contemplar todas as variações do terreno o qual se pretende representar. Childs (2004) ainda destaca que, quanto à técnica do Inverso da Potência das Distâncias:

The IDW function should be used when the set of points is dense enough to capture the extent of local surface variation needed for analysis. IDW determines cell values using a linear-weighted combination set of sample points. The weight assigned is a function of the distance of an input point from the output cell location. The greater the distance, the less influence the cell has on the output value. (CHILDS, 2004, p. 33).

Nessa direção, o cálculo do IDW funciona estimando os valores entre pontos vizinhos, de maneira que o valor determinado dos pontos vai possuir um peso normalizado através de um expoente fixo. O valor dos pesos é dado pelo usuário, sendo que, quando adotado um maior peso a um ponto, ele sofrerá menos influência dos pontos mais distantes e influenciará mais os pontos ao seu redor.

Já aqueles pontos aos quais se atribui menor peso sofrerão maior influência de pontos mais distantes dotados de um peso maior e não influenciarão intensamente os pontos a seu redor.

Figura 6 – Esquema teórico simplificado da forma como o processo de interpolação por IDW, determina o raio de influência do ponto central



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

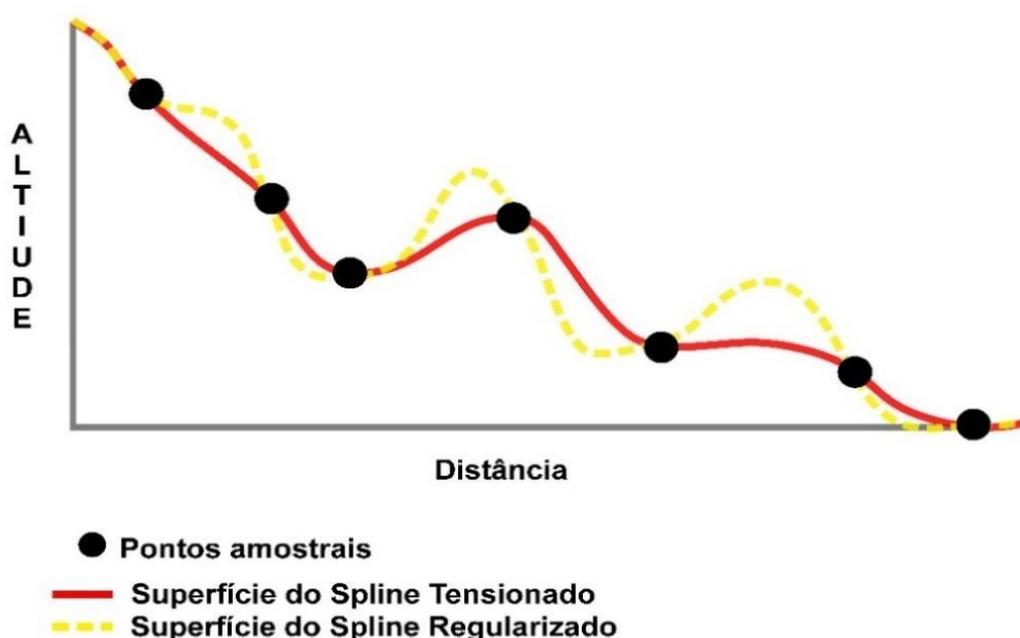
3.2.3.2.3 SPLINE

Spline são algoritmos que utilizam técnicas matemáticas para suavizar as superfícies representadas, obrigando que os planos da superfície passem pelos pontos amostrais, acompanhando seus valores. Matos (2005) destaca que existem diversos tipos de parâmetros, os quais podem ser utilizados para calibrar os Spline para ajustá-los da melhor forma, com a intenção de que se acompanhe os valores das amostras. O autor completa ainda, destacando a potencialidade dos Spline para gerar modelos digitais de elevação em terrenos com suaves transições. Assim, consiste em desafio para tal técnica lidar com os locais de mudanças bruscas ou com pequenas distâncias, visto que os Spline “tende a exagerar o valor dos pontos interpolados nas áreas de variações bruscas” (MATOS, 2005, p. 75).

Tal afirmação corrobora as colocações de Childs (2004) ao dizer que “It can predict ridges and valleys in the data and is the best method for representing the smoothly varying surfaces of phenomena such as temperature” (CHILDS, 2004, p. 34).

Ademais, Childs (2004) traz a contribuição de diferir entre dois tipos de Splines: uma regularizada e outra tensionada (Figura 7). A primeira passa a levar três fatores em questão, o declive, a variação do declive e a taxa de variação do declive. O tipo tensionada, por sua vez, vai se ocupar apenas dos seus cálculos de declive e da variação do declive, resultando na obtenção uma superfície mais suavizada no MDE (CHILDS, 2004).

Figura 7 - Esquema teórico simplificado de como o processo de interpolação por Spline funciona, demonstrando a diferença entre as superfícies modeladas por Spline tensionado e por Spline regularizado



Fonte: Adaptado de Wasser e Goulde (2020).

3.2.3.2.4 VIZINHO NATURAL

O método de inferência espacial do Vizinho Natural, como já expresso em seu nome, parte de um ponto amostral central para inferir os valores dos pontos que o circundam. Ele se destaca por ser um determinador local, haja vista a não utilização de uma verificação geral nos dados amostrais e de variabilidade do fenômeno para estabelecer os valores (MIRANDA, *et al.*, 2018), como de médias aritméticas ou moda.

O funcionamento da técnica do Vizinho Natural para a construção de um MDE se baseia na triangulação de Delaunay e no diagrama de Voronoy para descobrir o valor mais apropriado de um ponto desconhecido. Através de um ponto amostral de valor altimétrico conhecido, com maior peso relativo na área delimitada pelo diagrama de Voronoy, são estimados os valores de

todos os pontos desconhecidos dentro de sua área de influência. A execução de tais cálculos em termos de *hardware* resulta em um tempo de processamento proporcional aos dados amostrais de entrada inicial (MATOS, 2005).

Para a triangulação de Delaunay, primeiramente é necessário criar triângulos os mais equiláteros possíveis. Para tanto, é usada uma técnica de elaboração de triângulos, agrupando 3 pontos amostrais de valor conhecido. Posteriormente, esses triângulos são circunscritos em um círculo, como destaca Felgueiras, de modo que “O círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular e não contém, no seu interior, nenhum ponto do conjunto das amostras além dos vértices do triângulo em questão” (FELGUEIRAS; CÂMARA, 2003, p. 16).

Por sua vez, pontos são criados no centro destes círculos concêntricos, os quais, ao serem interligados em um plano, dão origem a uma série de polígonos, chamados de diagrama de Voronoy. Esse tipo de divisão é um método utilizado em diversos campos para a divisão espacial de áreas de influência de um determinado fenômeno.

A ideia geral da construção destes polígonos se baseia na possibilidade da existência de uma proximidade maior entre alguns pontos amostrais em relação a outros, que precisam sofrer processos de nivelamento, para não gerarem superfícies com informações tendenciosas.

Nesse processo, então, elabora-se uma divisão da área a partir de um ponto central de origem (os pontos amostrais), obtendo-se como resultado uma delimitação da área através dos polígonos do diagrama de Voronoy. Estes desenham a menor distância possível entre dois pontos amostrais em relação aos vértices do diagrama, como destaca Moura (2009). A estudiosa ainda explica que os polígonos

resultantes podem ir além da simples divisão de áreas, e serem deformados naturalmente por características ambientais, que são resultado do atrito e a influência das massas de seus pontos geradores, que devem ter poder de organizar o espaço e definir a área de influência do ponto (MOURA, 2009, p. 11).

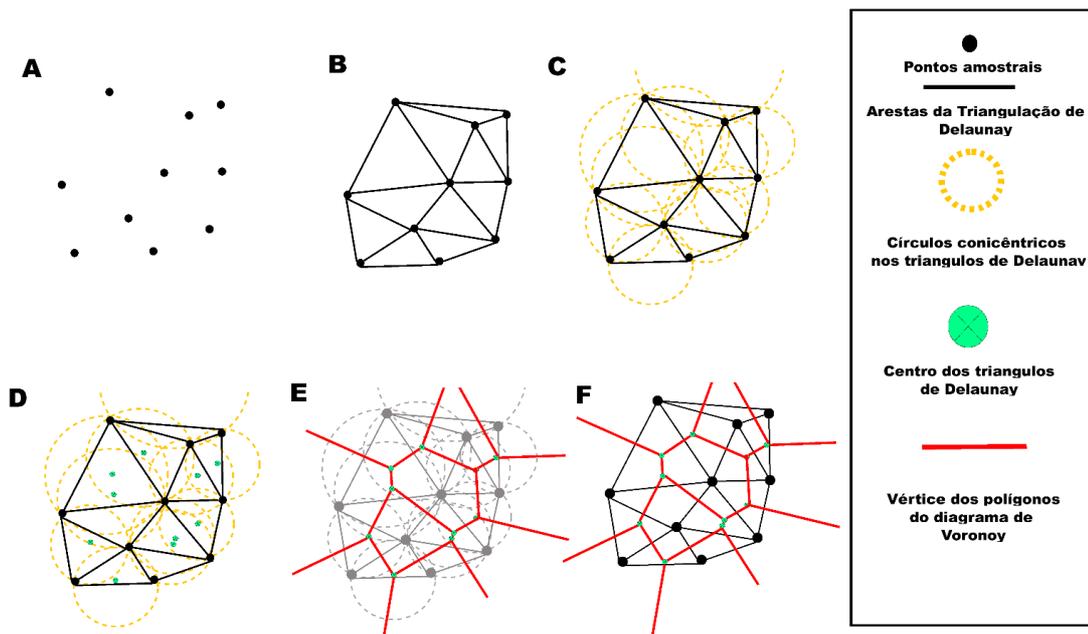
Em síntese, com uma nuvem de pontos amostrais (Figura 8.A), são criados triângulos interligando-os, de forma tal que esses pontos são usados como vértices destes triângulos (Figura 8.B). Os triângulos então produzidos são circunscritos em um círculo (Figura 8.C) cujo ponto central (Figura 8.D) é utilizado como vértice na construção de polígonos (Figura 8.E). Esses polígonos passam a compor o diagrama de Voronoy (Figura 8.F), resultando em uma divisão em que a distância para cada vértice do polígono é igual entre os pontos amostrais que o cercam.

Então, para a inferência dos valores de pontos desconhecidos, primeiramente são criados os polígonos de Voronoy com os dados amostrais. Subsequentemente, agrupam-se os

pontos amostrais com valores conhecidos, com os pontos de interesse mas de valores desconhecidos, gerando outra série de polígonos de Voronoy (MIRANDA et al., 2018). O peso de cada ponto amostral é dado entre a relação à área do polígono maior (fruto dos pontos amostrais) frente aos polígonos menores gerados a partir da junção dos pontos amostrais com os pontos de valores desconhecidos:

De forma mais clara, o algoritmo cria polígonos de Thiessen com base no conjunto de pontos amostrais, assim, cada ponto amostral terá um polígono de influência. Em seguida, insere o ponto a ser interpolado junto aos amostrais e gera, novamente, um outro conjunto de polígonos de Thiessen. O peso para cada ponto amostral ao redor do ponto a ser interpolado é dado em relação à proporção de área que o polígono de cada ponto amostral está sobreposto em relação ao polígono de Thiessen do ponto a ser interpolado. (MIRANDA et al., 2018, p. 237)

Figura 8 - Esquema simplificado da geração de diagrama de Voronoy a partir da triangulação de Delaunay. Ambas utilizadas na técnica de interpolação por meio de Vizinjo Natural



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.3 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – SIG

Com a evolução das tecnologias alinhadas principalmente ao avanço da informática no pós-guerra e ao desenvolvimento das ciências da informação, o processamento de dados georreferenciados foi intensificado:

As primeiras tentativas de automatizar parte do processamento de dados com características espaciais aconteceram na Inglaterra e nos Estados Unidos, nos

anos 50, com o objetivo principal de reduzir os custos de produção e manutenção de mapas. Dada a precariedade da informática na época, e a especificidade das aplicações desenvolvidas (pesquisa em botânica, na Inglaterra, e estudos de volume de tráfego, nos Estados Unidos). Estes sistemas ainda não podem ser classificados como “sistemas de informação” (CÂMARA; DAVIS, 2004)

Quase uma década após essas primeiras iniciativas, o primeiro Sistema de Informações Geográficas (SIG), o *Canadian Geographic Information System* — CGIS, surge, em 1965, no Canadá. Porém, desde o CGIS, já se passou mais de meio século, de modo que novas tecnologias, práticas e termos surgiram e se consolidaram no mercado, bem como continuam a surgir. Nesse contexto, é conveniente um breve resgate sobre a história, a evolução e os desafios dos SIG e do próprio Geoprocessamento.

Os mapas, sem a menor sombra de dúvida, ainda são os produtos de maior importância que compõem ou são produzidos por um SIG, mas atualmente não são os únicos a serem gerados, integrados e manipulados por ele. Como destaca Rocha (2019), os SIG, na realidade, são sistemas capazes de armazenar, integrar e tratar dados espacialmente referenciados e topologicamente estruturados. Dado isso, tais sistemas podem trabalhar com diversos formatos de dados, sejam eles mapas, tabelas, imagens, etc. (ZAIDAN, 2017).

Entretanto, as colocações aplicadas aos SIG da era moderna demandam que se compreenda como se desdobraram os diversos esforços ao longo da história da Cartografia, das Ciências da Informação, Geografia ou de outros campos que propiciaram o desenvolvimento dos SIG atuais.

Nessa tarefa, Silva (2003) resgata os primórdios dos SIG ainda no século XVIII e XIX, com os grandes mapeamentos feitos pelas potências europeias. Tais levantamentos tomavam para si o objetivo de estabelecer o conhecimento dos recursos disponíveis e de sua localização nas colônias dos impérios europeus. Com a recorrência de seus usos, acabaram por resultar na construção de grandes inventários de dados espaciais, como nunca se tinha visto antes.

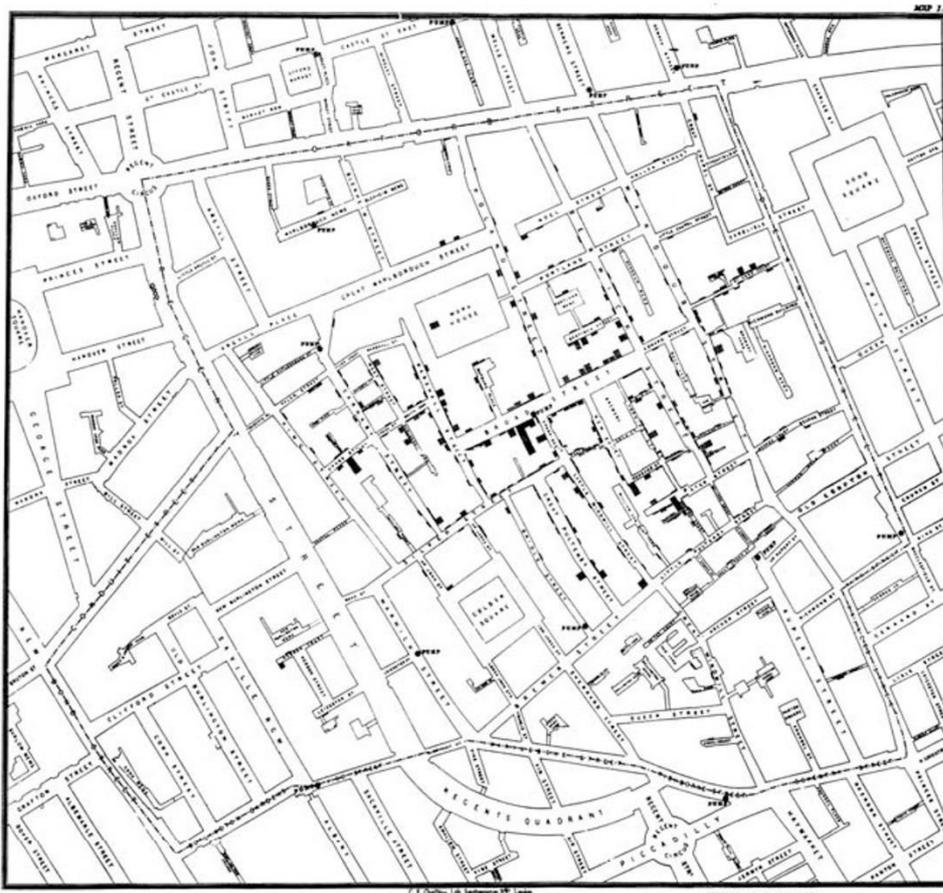
Tal autor ainda destaca que, ao longo do século XIX, ocorreu uma complexificação das relações comerciais e culturais a qual propiciou também uma incorporação da cartografia temática na vida cotidiana. No entanto, foi no século XIX que de fato o uso da cartografia como ferramenta e análise espacial ganhou espaço. Tanto que foi na Londres deste período o registro do “primeiro” trabalho de geoprocessamento da era moderna.

As formulações de Jhon Snow (1813 - 1858) sobre a epidemia de cólera que assolava certas regiões da cidade foi uma importante contribuição. Isso porque demonstravam como a sobreposição de dados georreferenciados era capaz de gerar informações e responder a questões complexas, insolucionáveis até então.

Em seu livro “O mapa fantasma”, Johnson (2008) destaca a história de alguns renomados pesquisadores que tentaram, cada qual à sua maneira, responder às questões ligadas à distribuição dos casos de cólera em Londres naquele período. No entanto, na realidade, foi o mapa de John Snow (Figura 9), mesmo em sua primeira versão, o marco inicial para a solução de tal problema:

O impacto visual do mapa era impressionante. Como representava uma grande faixa de Londres – desde a Hanover Square de um lado até a Soho Square do outro, percorrendo todo o caminho até a Piccadilly Circus –, era possível observar que onze bombas d’água não apresentavam casos de cólera nas proximidades. A bomba da Little Marlborough Street tinha alguns poucos traços pretos nas imediações, nada comparado com a grande concentração de mortes ao redor da bomba da Broad Street: os traços pretos se amontoavam pelas ruas vizinhas como se fossem os vários andares de um edifício. Sem um símbolo que destacasse a bomba d’água da Broad Street, os outros mapas de pontos da epidemia não tinham uma ordem clara, assemelhando-se a uma nuvem disforme que pairava sobre o extremo ocidental do Soho. No entanto, quando se enfatizava a imagem da bomba, o mapa ganhava uma súbita clareza. A cólera não se estendia difusamente sobre o bairro. Irradiava-se, na verdade, a partir de um único ponto. (JOHNSON, 2008, p. 206–207)

Figura 9 - Mapa de John Snow do surto de cólera da Golden Square em 1854



Fonte: Koch (2004).

Se o final do século XVII e o curso do século XVIII foram marcados por diversos avanços técnicos na cartografia, ao longo dos séculos XIX e XX estas inovações passam a estar ligadas mais a um desenvolvimento científico-tecnológico, propiciado principalmente pelos esforços de Guerra.

Ao longo da primeira metade do século XX, na Inglaterra, na Alemanha, na França e Estados Unidos, diversas iniciativas foram colocadas em prática para promover a sistematização e a automação do processamento de dados georreferenciados. Apesar dessa mobilização, tais iniciativas foram brecadas pelo baixo desenvolvimento tecnológico da época em termos de processamento e integração sistemática de dados. Ainda que tais investimentos fossem valiosos, somente na década de 1940, com os primeiros computadores eletrônicos, é efetivamente possível assistir ao surgimento de uma ciência da informação de dados georreferenciados (SILVA, 2003).

Câmara e Davis situam ao fim da Segunda Guerra Mundial, mais precisamente na década de 1950, o momento em que os primeiros esforços para a automação cartográfica passaram a ganhar corpo. Apesar disso, tais sistemas ainda não poderiam ser classificados como os primeiros sistemas de informação Geográfica

O que viria a ser considerado o primeiro Sistema de Informação Geográfica é o sistema canadense CGIS (CÂMARA; DAVIS, 2004; ROCHA, 2019; SILVA, 2003; ZAIDAN, 2017). O CGIS era o sistema de informações ambientais do Canadá, desenvolvido com vistas à promoção de estudos e levantamentos dos recursos naturais do país.

O próprio Tomlinson, seu principal criador, afirma que a mudança do ambiente analógico (mapas e tabelas em papel) para o digital (com o CGIS) permitiu um ganho de agilidade na manipulação e na geração das informações. Ademais, essa mudança possibilitou também uma maior precisão nos documentos e mapas gerados (TOMLINSON, 1988).

Desde o nascimento do CGIS, os SIG evoluíram, buscando formas muito mais completas de concretizar análises espaciais. Não se pode negar que o desenvolvimento da Tecnologia da Informação teve e ainda tem um papel fundamental na transformação de tais sistemas. Dessa forma, ao longo da segunda metade do século XX e das primeiras décadas do século XXI, observa-se o surgimento cada vez mais acelerado de *hardwares* e *softwares* que cimentaram uma revolução tecnológica. É dispensável dizer que, graças a esses recursos, eleva-se o patamar do processamento e da automação de dados georreferenciados a um outro nível.

As contribuições da exploração espacial, por exemplo, foram sensíveis aos SIG, tendo em vista o desenvolvimento de potentes sensores aeroespaciais e aerotransportados, capazes de

proporcionar novas perspectivas as análises espaciais. Esse é o caso da série Landsat, com seu primeiro satélite colocado em órbita já em 1972. Atualmente, conta com uma constelação de 7 satélites, possuindo a maior série histórica temporal de imagens de satélite de todo o planeta. (ROCHA, 2019).

Porém, como destaca Costa (2019), por mais que as Geotecnologias (entre elas os SIG) proporcionem um ganho material na velocidade e agilidade na aquisição, recuperação, manipulação e processamento de dados, não se deve jamais negligenciar a atuação de um profissional bem treinado para o desenvolvimento e aplicação dos SIG (COSTA, 2016). Assim, todo o avanço tecnológico que os SIG experimentaram nos últimos 60 anos não seria possível sem toda uma geração de grandes estudiosos das ciências da terra que foram capazes de promover o pleno desenvolvimento deste campo do conhecimento. Desta forma serão apresentados a diante as ações destes grandes pesquisadores e instituições no desenvolvimento dos SIG no Brasil.

3.3.1 O SIG e Geoprocessamento no Brasil

O professor Xavier-da-Silva (2001) destaca que os primeiros estudos relacionados ao geoprocessamento no Brasil foram iniciados ainda na década de 1970, com o projeto RADAM Brasil, iniciativa altamente custosa para o país. Entretanto, o projeto culminou na construção de uma estrutura robusta, com uma equipe bem treinada, além da aquisição de uma série de programas para análise, manipulação e recuperação de dados. Porém, após 1981, devido a relações conturbadas, o projeto acabou morrendo aos poucos e nunca foi capaz de alcançar o seu máximo potencial.

As primeiras iniciativas brasileiras quanto aos SIG, posteriores ao RADAM Brasil, estão ligadas principalmente ao professor Jorge Xavier-da-Silva no núcleo da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Zaidan (2017) sustenta que a vinda de Tomlinson, a convite do professor Xavier-da-Silva, foi de grande importância para o desenvolvimento e uso dos SIG e, portanto, para Geoprocessamento no Brasil:

Mas, a introdução do Geoprocessamento no Brasil inicia-se a partir do esforço de divulgação e formação de pessoal feito pelo prof. Jorge Xavier da Silva (UFRJ), no início dos anos 80, o qual trouxe ao Brasil, em 1982, o Dr. Roger Tomlinson, responsável pela criação do primeiro SIG (o Canadian Geographical Information System). (ZAIDAN, 2017, p. 197)

Câmara (1996) volta a destacar a importância de tal esforço do professor Xavier-da-Silva, dizendo que sua iniciativa ensejou diversos grupos de pesquisa no país. Assim, propicia-

se um ambiente favorável ao desenvolvimento, resultando, por exemplo, na criação do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geografia da UFRJ, MaxiDATA (CÂMARA, 1996) e do próprio núcleo de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

O fato é que os esforços do professor Xavier-da-Silva em trazer o Geoprocessamento para o Brasil na década de 1980 foram essenciais para ao ressurgimento da Cartografia brasileira dentro da Geografia, que de certa forma foi abandonada durante processo de rompimento da vertente teórica desde o final da década de 1970:

Em síntese, a partir das várias dimensões tratadas, o balanço feito por Rosely Archela sobre a Cartografia brasileira é otimista e destaca que se na época da Geografia crítica a Cartografia foi “abandonada”, ela ressurgiu, nos anos 1990, por causa das novas tecnologias, o que para ela se explica por que no período da globalização há uma exigência para uma Cartografia de “qualidade tecnológica” no interior da Geografia e a Geografia não poderia ficar fora disso (2000, p. 158). Isso é demonstrado com a quantidade de eventos sobre sensoriamento remoto, Cartografia digital e SIG. (FONSECA, 2004, p. 58)

Nos anos 1990 e nos anos iniciais de 2000, passou a ocorrer no Brasil uma disseminação maior dos SIG, resultado tanto de uma melhora na disponibilização de *softwares* os quais compõem os SIG como também dos componentes de *hardware*, alinhados ao seu barateamento de custo para aquisição. Naquele período, a evolução dos equipamentos e *software* foram fruto da “pressão dos usuários e a concorrência entre os fornecedores conseguiram fazer com que os custos diminuíssem, aumentando o número de usuários.”(RODRIGUES, 2001, p. 20).

No entanto, apesar de naquele período haver sido registrada uma ampliação da disponibilidade de *hardware* e o surgimento de *software* de maior qualidade, com preços relativamente acessíveis, a questão da habilidade dos usuários em acessar e manipular dados nos programas se configurava num grande desafio para a popularização efetiva do geoprocessamento no Brasil:

O grande desafio que se apresenta para os SIG na próxima década é o da simplificação do uso. É preciso tornar o acesso e a manipulação de dados geográficos mais simples e mais intuitivos para as pessoas, inclusive para reduzir um pouco a enorme necessidade de formação de pessoal que se observa hoje. Compreender o conteúdo de um banco de dados geográfico, por exemplo, é atualmente um pré-requisito para que uma consulta ou mesmo uma simples visualização possa ser obtida; basta ver as onipresentes interfaces para escolha das “camadas” que vão compor a visualização na tela. (RODRIGUES, 2001, p. 21)

Esse desafio que se impunha à popularização do SIG e do geoprocessamento no Brasil, no início dos anos 2000, foi superado em parte, principalmente pelo desenvolvimento de *softwares* mais amigáveis.

Em 2002 a empresa *Environmental Systems Research Institute (ESRI)* lançaria ainda as primeiras versões do *ArcGIS8*, um conjunto completo de *softwares* para a montagem de um SIG (ESRI, 2011) que se tornaria a ferramenta mais popular de geoprocessamento no país. No mesmo ano, seria ainda lançado o sistema *QuantumGis (QGIS)* que tinha uma proposta semelhante ao *ArcGIS*, de distribuir aos usuários um pacote completo de um sistema SIG, mas em código aberto, longe da ideia de programas ou sistemas proprietários que imperavam na área. Atualmente, o QGIS consiste na principal plataforma concorrente do *ArcGIS*.

Concomitantemente a esse processo, o INPE ainda desenvolveria e lançaria o TerraLibre e o TerraView plataformas de código livre para geoprocessamento, o instituto passou a ter o foco em desenvolver programas que não sejam baseados em sistemas proprietários para análises espaciais e para o desenvolvimento de ferramentas SIG, além de dar continuidade a consagradas plataformas como o Spring, que continua em desenvolvimento e aprimoramento desde 1996 até os dias de hoje (MILARÉ et al, 2016).

Contudo, as iniciativas de elaboração de *softwares* livres para trabalhar com geoprocessamento e geotecnologias no Brasil ainda não foram bem aceitas pela maioria dos usuários:

(...) entre as diversas controvérsias na utilização de softwares livres no Brasil, identifica-se as de dimensão política, social e econômica. Em nível administrativo, apesar de toda movimentação em favor do software livre, existem restrições à sua adoção, principalmente pela cultura de software proprietário. A manipulação da tecnologia livre pelo usuário comum é uma das principais dificuldades apontadas, mesmo com a difusão de comunidades e acesso a tutoriais na internet. (MILARÉ; SILVA; PARANHOS FILHO, 2016, p. 114)

O segundo maior desafio para a uso dos SIG no país, nos anos 90, residia principalmente no acesso às bases de dados espaciais. Fato é que, em nível nacional, não se dispunha de um sistema integrado e de fácil acesso a todos os usuários (XAVIER-DA-SILVA, 1995). Mas já na primeira década dos anos 2000, se iniciariam propostas para padronizar e disponibilizar dados geográficos a nível municipal, estadual e nacional de forma rápida e gratuita

Reflexo disso é a existência, atualmente, de diversas agências estaduais, federais e municipais as quais dispõem de plataformas próprias para a aquisição de dados espaciais gratuitos das mais diversas temáticas, sejam elas para análises ambientais, socioespaciais, socioambientais, socioeconômicas entre tantas outras.

Com o objetivo de promover a padronização e a sistematização dos dados espaciais em âmbito nacional, almejou-se a criação de uma plataforma nacional para a aquisição de dados espaciais. A necessidade da criação desta plataforma é algo que Xavier-da-Silva já destacava

em 1995, se tratando de bases de dados para a análises ambientais no Brasil, mas que se replicam aos demais tipos de temática de interesse a análise espacial no Brasil:

No Brasil tem sido tentada, por diversos órgãos, a criação de bases de dados de âmbito regional e mesmo nacional. As dificuldades de geração e manutenção destas gigantescas estruturas de armazenamento e recuperação de dados são imensas, proporcionais mesmo ao seu tamanho (...) outros órgãos tentam, no Brasil, manter bases de dados ambientais. É o caso, entre outros, do IBGE, do DNPM, do Ibama, do INPE. Uma característica básica dessas bases de dados é o seu caráter singular, sendo baixa ou nula a conversibilidade de dados entre bases diferentes. (XAVIER-DA-SILVA, 1995, p. 353–354)

E os empenhos na tentativa de criação de uma plataforma unificada para a aquisição de dados espaciais se consolidou através da criação da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais – INDE. Instituída pelo decreto Nº 6.666 de 2008, a plataforma tem como propósito fundamental:

catalogar, integrar e harmonizar dados geoespaciais produzidos ou mantidos e geridos nas instituições de governo brasileiras, de modo que possam ser facilmente localizados, explorados em suas características e acessados para os mais variados fins por qualquer usuário com acesso à Internet. (BRASIL, [s.d.])

Por tais razões, é possível concluir que desde as iniciativas do projeto RADAM Brasil, perpassando pelos esforços do professor Xavier-da-Silva alinhados à evolução dos equipamentos, programas e plataformas de acesso a bases de dados, atualmente o geoprocessamento e os SIG são pontos cruciais para o planejamento e gestão territorial no país. Esse desenvolvimento atende a usuários não apenas da Geografia, mas de diversos campos do conhecimento, nos setores públicos e privados.

3.4 A EVOLUÇÃO DOS ESTUDOS SOBRE MDE NO BRASIL

Os processos de refinamento e interpolação de dados de sensores aeroespaciais e aerotransportados são comuns na Cartografia digital, visto que as tecnologias da informação permitem, com relativa facilidade, as aplicações dos métodos geoestatísticos, os quais contribuem para o processo de refinamento e análise da precisão destes dados.

Existem várias técnicas para a execução de interpolações, como a Krigagem, o Inverso das Distâncias, Splines, Nearest Neighbour, séries de Fourier, entre outras, com potencialidades e falhas, de modo que cabe ao pesquisador compreendê-las, a fim de escolher a melhor opção no contexto de sua pesquisa (ARANA, 2016). São também diversos os trabalhos focados na aplicação de métodos de interpolação em MDE, com o intuito de refinar esses dados para melhores resoluções espaciais.

Paralelamente, existem estudos que se ocuparam da comparação entre os novos produtos obtidos e a sua qualidade no que tange à precisão e resolução espacial de levantamentos feitos com sensores que geram dados de maior qualidade, tais como Neuman, Silveira e Sampaio (2018), Naissinger e Thum (2017); Viana (2017); Miranda (2017); Da'Silva et al. (2015); Iorio et al (2012); Torlay, Victoria e Oshiro (2011), Chagas et al (2010).

No Brasil, destacam-se as contribuições de Valeriano na aplicação de técnicas para o melhoramento de MDE. O pesquisador foi responsável por aplicar técnicas de refinamento aos dados provenientes do SRTM de 3 arcos de segundo (resolução de cerca de 90 m) para produtos de 1 arco de segundo (resolução de cerca de 30 m), estudo esse que favoreceu a criação do sistema TOPODATA, como visto em Valeriano (2008), Valeriano e Rosseti (2010) e Valeriano e Albuquerque (2010).

A rápida evolução das tecnologias da informação e da sua apropriação pelos estudos e ferramentas topográficas favorecem, mais recentemente, opções de MDE com resoluções cada vez mais superiores. Um desses sensores é o PALSAR do satélite ALOS, que atualmente disponibiliza imagens com a melhor resolução espacial entre os produtos de acesso livre (12,5m). Decorre daí seu uso para análise e comparação, com outros MDE que já são validados e usados tradicionalmente, em diversos estudos e aplicações relacionados à topografia.

Dentre os trabalhos que se valem dessa estratégia comparativa com o ALOS-PALSAR, ressalta-se a pesquisa de Quina, Costa e Zaidan (2018) um estudo de caso na bacia do Córrego Tapera, em Juiz de Fora. Esse estudo encontrou forte similaridade entre o MDE e subprodutos gerados na modelagem de instabilidade de taludes, com o uso dos MDE do ALOS-PALSAR, quando comparados com materiais gerados a partir de MDE mais precisos, gerados através do sensor LIDAR. Posteriormente, Quina (2019) avança nesse debate. Ao analisar estatisticamente a precisão do ALOS-PALSAR frente ao sensor LIDAR – ambos interpolados para uma resolução espacial de 10m, foram obtidos resultados positivos, cujo índice chegou a 95% em alguns casos.

A comparação desta semelhança ainda foi proposta por Rocha *et.al* (2017), ao confrontarem a conformidade de pontos cotados e curvas de nível gerados pelo sensor LIDAR, SRTM e os observados nas cartas topográficas do IBGE, frente aos valores de altimetria extraída a partir de um MDE do ALOS-PALSAR. Nessa ocasião, foi comprovada forte similaridade entre os dados do LIDAR, com os gerados pelo ALOS-PALSAR com diferenças nas medianas das cotas da ordem de 0,87 m.

Também Miranda (2017) contribui para os estudos ao destacar a influência do método de interpolação na geração dos MDE, fomentando um debate sobre como a forma de

distribuição da nuvem de pontos que lhes dão origem afetam os resultados finais. Ao se analisar a nuvem de pontos para uma área de 0,97 ha não foram encontradas diferenças ou melhoras de qualidade significativas ao aplicar métodos de interpolação usando amostras de 250 a 3000 pontos (o valor máximo a que se chegou). No que tange aos métodos de interpolação, constatou-se uma certa tendência a melhores resultados para TIN e Vizinho Natural que possuíram resultados idênticos a Krigagem.

Apesar da relevância de todos esses estudos, cabe explicitar que a revisão bibliográfica apontou significativa ausência de pesquisas que busquem, de modo integrado, promover a análise da acurácia do ALOS-PALSAR, em diferentes configurações topográficas, com discussões mais aprimoradas dos métodos de interpolação para gerar e refinar estes MDE e suas possíveis potencialidades e falhas.

Esta seria uma demanda importante pois, de acordo com a distribuição e configuração topográfica, os sensores podem registrar de forma distinta a energia refletida por essas formas, desencadeando uma variação no próprio MDE, a qual, posteriormente, pode ser ressaltada ou mitigada pelos métodos de interpolação aplicados na melhoria ou generalização de tais produtos.

A influência da morfologia na construção de MDE foi defendida por Micelli *et al.* (2011), ao compararem o comportamento dos diferentes valores altimétricos dos MDE de sensores distintos em áreas morfologicamente dessemelhantes. Enquanto isso, Fernandes e Menezes (2005), em estudo realizado com MDE no Maciço da Tijuca, no Rio de Janeiro, demonstraram que métodos de interpolação distintos provocaram uma variação de erro médio nos resultados, flutuando entre 5% e 57%.

O debate que foi levado mais adiante pelos trabalhos de Marion, Santos e Hendges (2015), além das contribuições de Tesk, Giasson e Bagatini (2014), de um ano antes, ambas demonstrando a diferença entre as formas de relevos representados em MDE de satélites distintos na mesma área, por meio de perfis de relevo com perfilamento contínuo.

Portanto, pesquisas que verifiquem o comportamento dos MDE de forma integrada, analisando seu comportamento em diferentes feições geomorfológicas, com vários métodos geoestatísticos de refinamento e de interpolação, poderiam ser capazes de indicar quais procedimentos deveriam ser adotados em cada tipo de morfologia. De posse dessas informações, seria possível aproveitar o máximo do potencial de uso de acordo com possíveis melhorias obtidas em sua resolução espacial.

4 **ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo se encontra na região oeste de Juiz de Fora, município localizado na região da zona da mata do Estado de Minas Gerais. A ocupação histórica desta área remonta a iniciativas do império, que estimulava a vinda de imigrantes para o país.

Aproveitando desta política governamental e alinhando-a com seu interesse de conseguir mão de obra para a construção da atual Estrada União Indústria, Mariano Procópio incentiva a vinda de imigrantes para a região os quais vão ocupar as localidades hoje denominadas São Pedro e Borboleta (MOURA, 2017).

Durante muito tempo, por conta de sua topografia acidentada, de difícil acesso, a região foi classificada como zona rural, sendo empregados grandes investimentos para sua urbanização a partir dos anos 50:

Durante muito tempo essa região foi considerada zona rural da cidade, uma vez que, a topografia elevada criava inúmeras dificuldades para se chegar até o local. Foram necessários investimentos em estruturas urbanas para iniciar um desenvolvimento mais efetivo dessa área. (MOURA, 2017, p. 52)

Devido a essa característica altimétrica, a região acabou recebendo o topônimo popular de “Cidade Alta”. Consiste atualmente em uma região que compreende mais de 50 bairros em toda a região oeste do município.

A chamada Cidade Alta recebeu o nome em função de cotas altimétricas mais elevadas em relação ao centro da cidade, sendo a região compreendida na escarpa do platô que divide as bacias do rio do Peixe e rio Paraibuna. Ela está situada administrativamente na Região Oeste da cidade e se identifica com a Região de Planejamento São Pedro (JUIZ DE FORA, 2004), sendo dividida em oito regiões urbanas com aproximadamente 50 bairros. (GERALDO, 2011, p. 69)

A realidade descrita por Moura (2017) é a de que a região, inicialmente não ocupada por conta da sua topografia, se transforma ainda na década de 1970. Essa modificação é assinalada quando, na elaboração de um novo plano diretor da Cidade de Juiz de Fora, passa a ser considerada como uma zona de potencial de expansão e ocupação urbana da cidade.

Esse já era um processo esperado, tendo em vista que diversas grandes estruturas de serviço estavam sendo alocadas no local, como a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), inaugurada em 1972, ou até mesmo o antigo Aeroporto da Serrinha (1958). Não é possível discorrer ainda sobre a evolução histórica da região sem considerar a evolução da rede viária local, pois, como Juiz de Fora foi uma cidade construída em função das estradas, a “Cidade Alta” não seria diferente (MOURA, 2017).

Se os primeiros moradores vieram ainda para a construção da antiga estrada União indústria, anos mais tarde, a abertura da BR-040 (1980) e da Avenida Independência (1978) (com apenas dois anos de diferença entre uma e outra) foram importantes atrativos para promover uma maior circulação de pessoas e de serviços na região (MOURA, 2017).

Essa forte ligação entre o desenvolvimento da “Cidade Alta” com o sistema viário é ainda presente nos dias atuais. O processo, em andamento da BR-440, tem na atualidade dividido opiniões quanto à validade de sua implementação e dos possíveis problemas socioambientais que são deflagrados na região (SANTOS, *et al.*, 2017) em contraste com as promessas de desenvolvimento e mobilidade para a região.

Atualmente a região oeste se configura como a principal área com potencial de expansão urbana. Geraldo (2011) vai destacar no que diz respeito a números, a região é umas das poucas com um número superior de lotes vagos em relação aos ocupados, o que teoricamente vai propiciar um estímulo do mercado imobiliário e ocupação da área ao longo dos próximos anos:

A região possui grande potencial de adensamento, uma vez que segundo cadastro municipal apresentava 6.076 construções entre lojas, apartamentos e galpões, entre outros e 7.456 lotes vagos (DEMLURB, 2008), superando o número de construções. O fator espaço é condicionante fundamental para o mercado imobiliário, afinal cada novo empreendimento requer um novo solo. (GERALDO, 2011, p. 83)

Essa contextualização da “Cidade Alta” é importante, pois a área em análise pela pesquisa se encontra no interior deste processo de transformação e construção do espaço urbano de Juiz de Fora.

4.1 O RECORTE DE ESTUDO

A área de estudo eleita pela presente pesquisa consiste em um pequeno recorte espacial da “Cidade Alta”, ao todo somando uma área de 25 km², que engloba parcial ou totalmente os bairros: Bosque do imperador, São Pedro, Caiçaras, Cruzeiro de Santo Antônio, Amazônia, Milho Branco e Pedra Bonita (Figura 10).

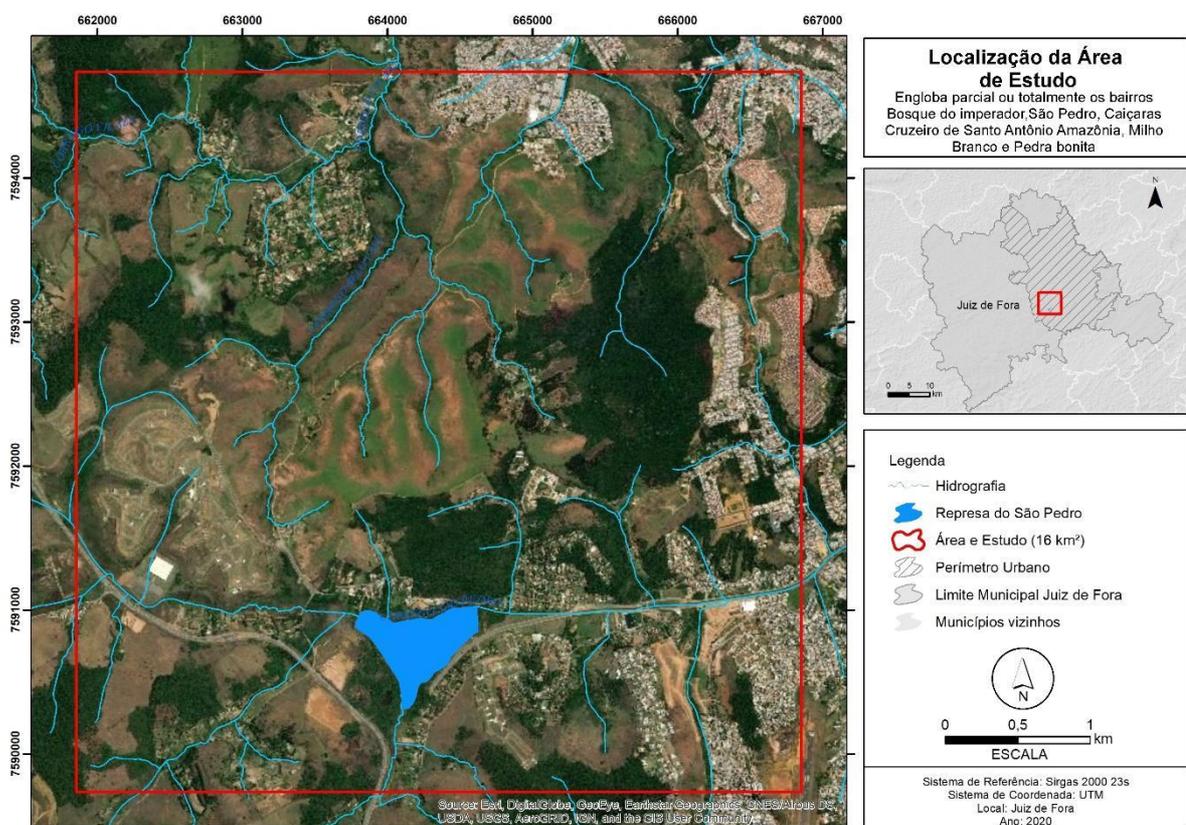
A escolha desta área é estratégica por diversas razões. Primeiramente, o município possui, para esse local, levantamentos topográficos a laser de alta precisão, produzidos com o sensor LIDAR, os quais são utilizados de parâmetro base para a comparação da acurácia dos novos produtos gerados.

Sua hipsometria também é um fator relevante, uma vez que apresenta uma variação no seu gradiente altimétrico com um pouco menos de 330 metros, entre os valores do MDE

proveniente do ALOS-PALSAR e o MDE do LIDAR. Da mesma forma, a declividade na área ultrapassa os 45 graus onde nos produtos provenientes do LIDAR chega a valores máximos na casa dos 61 graus.

Essa equação entre uma acentuada variação altimétrica e valores de declividade da área de estudo transformam-na em um recorte espacial que possibilita tanto a verificação da altimetria entre os dois MDE, quanto a geometria das formas das vertentes representadas em ambos os modelos.

Figura 10 - Mapa de Localização da Área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tratando ainda da análise de formas do relevo, soma-se o fato deste recorte ter como característica um contexto de ocupação interessante. Por possuir uma rugosidade urbana singular, com áreas que sofreram grande, média, baixa e até mesmo nenhuma ocupação, tal recorte viabiliza a observação do comportamento e dos produtos gerados no processo de interpolação, em diferentes níveis de antropização do relevo, além do tipo e da cobertura do solo.

Valeriano (2008) destaca que no caso do SRTM o “efeito dossel⁷” foi capaz de interferir em até 80% dos valores altimétricos dos MDE. Esse comportamento pode produzir falhas nas informações de altimetria, bem como nas derivadas delas, como é o caso da declividade:

Relata-se (KELLNDORFER et al., 2003) que até 80% da altura de dossel foram expressos nos dados SRTM, como acréscimos à altitude do terreno. Por esta relação, variações de 15m na altura de dossel seriam suficientes para criar artefatos totalmente vegetacionais em isolinhas de 10m. (VALERIANO, 2008, p. 83)

Fato é, que em uma área de estudo com composição de uso e cobertura tão diversa, como a selecionada, possibilitou avaliação do comportamento do efeito dossel nos dados gerados a partir do ALOS-PALSAR.

Por fim, tal recorte ainda apresenta um grande inventário de análises ambientais, geológicas, geomorfológicas, pedológicas, socioespaciais entre tantas outras, principalmente devido à sua proximidade com o campus sede da UFJF. Esses estudos configuram-se um referencial teórico e de diagnósticos ambientais de grande importância para a caracterização da área e para a compreensão de fatores a influenciarem na construção dos modelos digitais de elevação. Tais fatores não poderiam ser levados em conta em uma área carente de um histórico tão amplo (tanto de temáticas quanto temporal) de análises científicas.

⁷ O “efeito dossel” é referente à capacidade de um sensor absorver os valores dos corpos sob a superfície e computar esses valores na geração dos MDE, promovendo um erro altimétrico no modelo que altera as formas geomorfológicas e os índices extraídos a partir delas (como declividade, hipsometria, etc.).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

5.1.1 Produtos altimétricos do ALOS-PALSAR

Os produtos altimétricos do ALOS-PALSAR são provenientes do satélite Japonês ALOS desenvolvido pela Agência de Exploração Espacial Japonesa (*Japan Aerospace Exploration Agency - JAXA*).

A JAXA nasce em 2003, por meio da integração de três agências governamentais distintas: o Instituto de Ciências Espaciais e Astronáuticas (ISAS), o Laboratório Aeroespacial Nacional do Japão (NAL) e a Agência Nacional de Desenvolvimento Espacial do Japão (NASDA).

O projeto ALOS foi idealizado dez anos antes da fundação da JAXA, em 1992, com o início das etapas de análise da viabilidade do projeto, pesquisa e desenvolvimento dos sensores. Em 1998, com essas etapas superadas e confirmada sua viabilidade, se iniciou o projeto de construção em larga escala dos componentes, resultando no lançamento do satélite em 2006 (JAXA, 2008).

A iniciativa toma como objetivo viabilizar o acesso a materiais de alta resolução espacial a nível mundial, de modo a auxiliar, com uma ferramenta para a pesquisa, no enfrentamento de problemas ambientais os quais assolam o mundo cada vez mais. Esse objetivo é congruente com o de cooperação mundial pelo meio ambiente, recorrente nas conferências mundiais dos últimos anos (JAXA, 2008).

O ALOS possui três sensores principais, quais sejam, o *Panchromatic Remote-sensing Instrument Stereo Mapping (PRISM)*, o *Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR-2)* e o *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR)*.

Dentre os produtos gerados por esses sensores, o AVNIR-2 é capaz de obter imagens de alta resolução em quatro bandas do infravermelho visível e próximo, com um campo de visada na casa dos 5,8 graus, gerando imagens capazes de cobrir uma faixa de 70km com uma resolução espacial de 10m (JAXA, 2008).

Por sua vez, tanto o PRISM quanto o PALSAR conseguem gerar dados de altimetria e, conseqüentemente, modelos digitais de elevação. Contudo, eles vão se distinguir na resolução, capacidade de imageamento frente a condições atmosféricas e à autorização para acesso aos seus dados. O PRISM funciona como um radiômetro microcromático sensível à região do

infravermelho próximo, além de três telescópios, mas com a orientação de visada do nadir invertida para atrás (JAXA, 2008).

A integração entre os dados dos telescópios, para frente e para atrás, possibilita a obtenção de uma relação base e altura dos corpos terrestres. Isso permite a construção de imagens tridimensionais da superfície terrestre com uma resolução espacial de 2,5 m, através de imagens com uma largura de 35x70 km. Mas o acesso aos dados provenientes do PRISM não é livre (JAXA, 2008) sendo necessária a aquisição por meio de empresas que comercializam esse produto.

Por fim, o PALSAR é um sensor de radar de abertura sintética da banda L capaz de imagear a terra em quaisquer condições climáticas, tanto no dia quanto à noite. Possui uma faixa de imagens de 70 km com uma resolução máxima de 10m (JAXA, 2008).

Contudo, apesar de a resolução máxima ser de 10m, a resolução dos produtos gerados varia entre 6,5m (para 2look⁸) não disponível para download diretamente e 12,5m (4look) disponível para aquisição e já tratadas com um nível de processamento 1.5. Esse nível de processamento 1.5, se refere àquelas “Imagens processadas com aparência múltipla projetada para mapear coordenadas. As latitudes e longitudes no produto são calculadas sem considerar a altitude.” (JAXA, 2008, p.99).

Todos os dados do sensor PALSAR são de acesso livre a qualquer pessoa, mas de acordo com o continente, são disponibilizadas por plataformas específicas. No continente Americano, por exemplo, os dados são disponibilizados pelo repositório Alaska Vertex, ligado ao *Geophysical Institute of the University of Alaska Fairbanks*.

5.1.2 Produtos altimétricos do LIDAR

A compressão LIDAR se refere ao termo em inglês *Light Detection And Ranging*. A tecnologia LIDAR funciona de forma semelhante a um sistema de radar, diferindo-se deste apenas pelo fato de usar pulsos de laser ao invés dos pulsos de rádio usados normalmente pelos radares (GIONGO et al., 2010). Desse modo, um sensor ativo, por meio da emissão de pulsos em intervalos constantes, em uma plataforma de voo com altura fixa, calcula a relação de tempo

⁸ O termo look, se refere aos números de subdivisões que uma imagem de radar é submetida para que possa ser compensado o efeito de ruído de speckle. Quanto menor o número de visadas, melhor a resolução da imagem, porém maiores são os valores de inconsistências nos dados dando a aparência do que é chamado de “salpicamentos” na imagem (SILVA, 2013)

entre a emissão do pulso inicial e a detecção da onda retroespalhada após a sua interação com os alvos (MACIEL, 2011).

O LIDAR ainda possui um sistema de navegação sofisticado que permite, alinhado com a tecnologia de laser, obter grande precisão com relação à posição e à localização dos dados coletados. Em razão de contar com um Sistema de Navegação por Satélite, é capaz de fornecer a posição da aeronave (plataforma do sensor). Além disso, conta com o Sistema de Navegação Inercial “que determina os ângulos de altitude da aeronave, possibilitando assim o cálculo da distância entre o sensor e o alvo situado no terreno” (BASTOS; FILHO, 2012, p. 01).

Os levantamentos feitos através do LIDAR têm se tornado cada vez mais populares, haja vista a sua aptidão em promover a rápida aquisição de dados, mesmo em áreas com certa dificuldade de acesso, a um custo relativamente baixo (BASTOS; FILHO, 2012; GIONGO et al., 2010; MACIEL, 2011) se comparado com os métodos tradicionais de levantamentos topográfico a partir de estações totais ou teodolitos.

O levantamento LIDAR utilizado nos processos comparativos desta pesquisa são produtos do aerolevanteamento feito pela prefeitura em 2007, tanto nas áreas urbanas como rurais do município, como destacado por Quina (2019):

O produto originário do sensor LIDAR, refere-se a um Mapeamento Digital realizado pela Prefeitura de Juiz de Fora, entre os meses de junho a setembro de 2007, que por meio de cobertura aerofotogramétrica e perfilamento a LASER aerotransportado, foi possível adquirir imagens e curvas de nível da superfície do município, respectivamente, com altos níveis de detalhamento. Segundo informações retiradas do site da instituição, os levantamentos aerofotogramétricos recobrem todo o município de Juiz de Fora, contemplando assim sua área urbana e também a zona rural (...) Tal perfilamento foi utilizado por meio do sensor LASER LEICA ALS-50 PHASE II de 150 khz, composto por um scanner a LASER infravermelho, um sistema de referência inercial (IMU) e um receptor GPS (QUINA, 2019, p. 123)

Cumprir lembrar que os dados referentes a tais levantamentos foram disponibilizados pelo LGA- Laboratório de Geoprocessamento Aplicado ligado ao departamento de Geociências da UFJF e pelo NAGEA - Núcleo De Análise Geo Ambiental ligado ao departamento de Transporte e Geotecnia também da UFJF.

5.1.3 O ambiente MatLab

MatLab é a forma abreviada do termo *MATrix LABoratory* (Laboratório de Matrizes), nome de um *software* de computadores voltado para cálculos científicos, inicialmente elaborado para a execução de operações e análises com matrizes. Contudo, devido à sua

versatilidade, com o passar do tempo, o *software* evoluiu para uma importante ferramenta capaz de resolver um número incontável de problemas técnicos (CHAPMAN, 2016).

As bases para a construção do MatLab surgem na década de 1970, quando um grupo de pesquisadores propõe à Academia Nacional de Ciências norte-americana uma pesquisa de viabilidade e desenvolvimento de um programa de alto nível para cálculos matemáticos, que daria origem ao EISPACK (*Matrix Eigensystem Package*). Ainda na década de 1970, outro grupo de pesquisadores apresentou um projeto semelhante ao EISPACK, que deu origem ao LINPACK (*Basic Linear Algebra Subprograms*) o qual possuía uma série de bibliotecas para a resolução de equações lineares. Mais tarde, a partir desse projeto, surgiria o FORTRAN (*FORmula TRANslation System*) (MOLER, 2018).

Entretanto, foi no final da década de 1970 que Cleve Moler, utilizando uma adaptação do EISPACK, LINPACK e FORTRAN, criaria e apresentaria para alunos da sua turma na Universidade do Novo México e Stanford a primeira versão do MatLab. Anos mais tarde, dois desses alunos, Jack Little e Steve Bangert, juntos ao próprio Cleve Moler, remodelaram e melhoraram a ferramenta, lançando-a no mercado em 1984 (MOLER, 2004) para vir a se tornar a versátil ferramenta que é atualmente.

Um das maiores qualidades do ambiente MatLab reside na sua capacidade de funcionar como uma calculadora comum, e também como linguagem de programação própria (TONINI; SCHETTINO, 2002). Quando funciona como linguagem de programação, o programa é habilitado a atuar com uma IDE⁹ embutida capaz de auxiliar na escrita do código para o usuário.

Atualmente, as ciências espaciais têm redescoberto a potencialidade do programa para fazer análises espaciais e ambientais, uma vez que dados matriciais são largamente utilizados em SIG e podem ser facilmente incorporados pelo ambiente Matlab. Um exemplo prático desta realidade, é o trabalho de Refice, Giachetta, Capolongo (2012), que buscavam modelar a evolução de paisagens, e ao usarem o Matlab o consideraram a ferramenta ideal para esse tipo de análise espacial, pois conseguiam promover os ajustes necessários para a adequação na aplicação do modelo de maneira simples e fluída:

Use of the Matlab programming environment allows recourse to a huge number of existing tools for visualization and further data processing, thus greatly enhancing the model suitability for application environments, theoretical research, and didactic purposes. Some examples of simple

⁹ IDE é a sigla do termo *Integrated Development Environment*, que basicamente são sistemas integrados que auxiliam desenvolvedores na escrita do código corrigindo basicamente a sintaxe e sugerindo novas formas de escrita do mesmo comando de forma automática.

enhancements to the present version which could be made in a relatively straightforward manner to increase the code flexibility include the mentioned use of dynamic instead of static process parameters, and the creation of a graphical user interface (GUI) to ease the introduction of parameters. (REFICE; GIACHETTA; CAPOLONGO, 2012, p. 303)

Observa-se a vasta gama de possibilidades e de versatilidade de tal ferramenta para as Geociências, dado que seu uso não se restringe à análise ambiental por si só. As contribuições de Barbosa e Sá (2016) demonstraram o potencial da plataforma para o ensino através do desenvolvimento de uma aplicação para o ensino de Cartografia, voltada a alunos com deficiência visual e com baixa visão, baseado também na linguagem Matlab.

5.1.4 O ambiente ArcGIS

O ArcGIS é um conjunto de programas desenvolvidos pela empresa norte americana *Esri - Environmental Systems Research Institute*. Originalmente, tal ferramenta foi criada para que os usuários fossem capazes de criar mapas e espacializar dados, contudo, com o passar do tempo, outras funcionalidades e ferramentas de análise acabaram transformando-a em uma das melhores ferramentas para GIS atualmente (NASSER, 2015).

A *Esri* foi fundada em 1969, na Califórnia, pelo casal Jack e Laura Dangermond, com o intuito de fornecer consultoria privada focada em análise de uso e ocupação da terra, atuando em importantes projetos ao longo da década de 1970. Ao longo dos anos 1980, a empresa passou a voltar seus esforços para a construção de uma coleção de *softwares* e de ferramentas para computadores que fossem capazes de serem usadas para a criação de um SIG (ESRI, 2011).

Ainda na mesma década, a empresa lançou o seu primeiro pacote de *softwares* voltados para GIS, o ARC / INFO. O sucesso foi tamanho que a empresa abandonou o escopo das consultorias e passou a focar apenas na produção de pacotes de *softwares* direcionados a aplicações em GIS. Na década seguinte, a empresa lançaria o *ArcView*, uma excelente ferramenta de mapeamento desktop, acessível e com grande facilidade de aprendizado (ESRI, 2011) prelúdio de uma nova geração de produtos da empresa que viriam a dominar o mercado na virada do século.

No início dos anos 2000, a *ESRI* iniciaria a distribuição de um audacioso projeto, um grande pacote de programas que formariam um conjunto completo de um GIS, o *ArcGIS 8* (ESRI, 2011). O sucesso foi tanto que diversas versões e melhorias se sucederam e, quase 20 anos mais tarde, o *ArcGIS 10.9* já é uma realidade. Assinala-se, desse modo, a consolidação da ferramenta como o principal conjunto de *softwares* GIS no mercado atual.

E com o surgimento e popularização da internet de banda larga e a tecnologia 5G, a hegemonia da Esri deve se manter como a líder do mercado uma vez que a empresa já passa a consolidar ferramentas de geoprocessamento com o foco em processamento e hospedagem de dados na web. Dentre esses produtos emergentes se destaca o ArcGisOnline uma plataforma 100% online para a criação e compartilhamento de mapas online e um conjunto softwares desktop, com um escopo de comunicação e troca de dados online para facilitar a aquisição, tratamento e compartilhamento de dados entre os usuários como o ArcGisPro ou o ArcGIS Survey123.

Assim, a opção pela utilização do ArcGis para a execução das análises nesta pesquisa se justifica pelo fato de ser um dos mais populares programas de geoprocessamento e de análise ambiental no mercado sendo um cenário que tende a se manter pelos próximos anos. Assim consequentemente, analisar os interpoladores presentes em tal programa e suas potencialidades e ruídos na geração de MDE é de considerável importância. Em síntese, a intencionalidade é demonstrar como, no cerne de uma ferramenta tecnicamente acessível à maioria dos pesquisadores, como cada método de interpolação estatística ali disponível pode gerar erros e acertos ao tratarem MDE. Erros estes que poderiam ser reverberados nos demais produtos gerados nas análises a partir de tais MDE.

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Tratamentos iniciais dos MDE

O processo de comparação dos MDE tem seu início com a interpolação, através de diferentes técnicas, dos dados provenientes do sensor PALSAR, com 12,5m, para outras três resoluções espaciais de 10m, 8m e 6m. São analisados os comportamentos de 4 interpoladores presentes no ArcMap 10: *IDW, Krigagem, Spline e Vizinho Natural*.

Para a execução deste tipo de interpolação, foi carregado o *raster* original do ALOS-PALSAR da área de estudo, com 12,5m de resolução espacial. Posteriormente, através da rotina *ArctoolBox* → *Conversion tools* → *From raster* → *Raster to point*, é extraído do *raster* uma nuvem de pontos referentes aos valores altimétricos.

Partindo-se dessa nuvem de pontos, começa o processo de interpolação através dos métodos de IDW, Spline, Vizinho natural e Krigagem pela rotina *ArctoolBox* → *Spatial analysty tools* → *Interpolation* → *O método a ser aplicado*. Ao definir os parâmetros do novo *raster* de saída, foram determinadas duas resoluções espaciais básicas: 10m, 8m e 6m.

5.2.2 Geração do MDE para a comparação

Os MDE gerados a partir das curvas de nível obtidas pelo sensor LIDAR foram usados como base da comparação, devido à resolução espacial dos dados de origem ser originalmente mais precisa. Desta forma, **a precisão dos MDE interpolados do ALOS-PALSAR será determinada em relação aos MDE gerados através do LIDAR.**

A opção pela utilização de um MDE gerado a partir das curvas de nível com equidistâncias de 1m, através de um modelo triangular de superfície (TIN), se justificou por dois motivos principais. O primeiro é referente à tentativa de eliminar os ruídos do chamado “efeito dossel” nos MDE base de comparação, com a intenção de promover a comparação correta da altimetria nos produtos ALOS-PALSAR, já que esse problema esteve presente na maioria dos MDE gerados pelo SRTM, como destacado por Valeriano (2008). Partindo das curvas de nível já ajustadas, a representação do relevo seria mais próxima ao real possível para a comparação, não incorrendo o risco de computar a altura de elementos contidos sobre a superfície resultado do efeito dossel.

O segundo é que a interpolação de curvas de nível para a geração de MDE, por meio do TIN, é visto por alguns autores mais apropriado para a representação de relevos, devido à sua capacidade de considerar na sua interpolação as linhas de estrutura, linhas de quebras e outras particularidades do terreno. (CÂMARA, 1996; ROCHA, 2019).

Por mais que ocorra a opção dentro da plataforma *ArcGIS 10* de aplicação do algoritmo *topo to raster*, o qual também possibilita a capacidade de integrar as discontinuidades do terreno, Carmo et. al (2015) ressalta o fato da possibilidade de deformações tanto no centro quanto nas bordas de MDE gerados pela aplicação deste algoritmo.

Para a geração de tal MDE, no *ArcMap10*, foram inseridos os vetores das curvas de nível de equidistâncias de 1 m, os vetores da hidrografia e dos corpos d' água da região e, por fim, a nuvem de pontos cotados, todos referentes ao levantamento aerofotogramétrico da Prefeitura Municipal de Juiz de Fora feitos em 2007.

Esses dados foram transformados em um TIN, pela rotina *ArctoolBox* → *Conversion tools* → *From raster* → *Raster to point*. Posteriormente, foram convertidos para um MDE em formato *raster*, segundo a rotina *ArctoolBox* → *3D Analyst Tools* → *Conversion* → *From Raster* → *Tin to Raster*. Foram estabelecidas as mesmas resoluções espaciais de 10m, 8m e 6m para os *rasters* de saída, capazes de criar uma base de comparação entre as matrizes dos demais

MDE, criados pelas diversas técnicas de interpolação analisadas tendo como origem o ALOS-PALSAR.

5.2.3 Geração dos Subprodutos para a comparação

Tendo em vista que a análise empírica possibilita a observação de padrões de distribuição e configuração de certos fenômenos que escapam à capacidade analítica e sistemática estatística, fez-se necessário promover também uma avaliação qualitativa das informações mais elementares obtidas através do MDE - como a hipsometria e declividade - bases para demais análises ambientais. Quina (2019) sustenta a necessidade desta análise integrar-se as avaliações dos MDE, promovendo tanto avaliações estatísticas entre os MDE, quanto qualitativa dos seus subprodutos na sua comparação entre os dados do ALOS – PALSAR e LIDAR na região do Córrego Tapera em Juiz de Fora - MG.

Nesse sentido, ocorre a avaliação qualitativa entre os modelos digitais de elevação e de dois subprodutos gerados a partir de suas informações: a declividade e hipsometria, na tentativa de analisar como ocorrem as possíveis distorções das informações do terreno expressas nestas cartas temáticas fruto do processo de interpolação.

5.2.3.1 Declividade

Para a determinação das classes de declividade, foi estabelecida como base de referência a classificação da Embrapa (1979). Esse tipo de classificação é o mais utilizado no Brasil, a qual divide a declividade em seis classes:

Plano - superfície de topografia esbatida ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos, com expressiva ocorrência de declives de 0 a 3%. **Suave ondulado** – superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros (elevações de altitudes relativas de 50 a 100m, respectivamente), apresentando declives de 3 a 8%. **Ondulado** – superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros apresentando expressiva ocorrência de áreas com declives de 8 e 20%. **Forte ondulado** – superfície de topografia movimentada formada por outeiros e/ou morros (elevações de 100 a 200 m de altura de relativa), com predominância de declives de 20 a 45%. **Montanhoso** - superfície de topografia vigorosa, com predominância de formas acidentadas, usualmente constituída por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes da ordem de 45 a 75%. **Escarpado** - regiões ou áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo escarpamentos tais como: aparados, itaimbês, frentes de cuevas, falésias, vertentes de declives

muito fortes de vales encaixados, etc., com declives acima de 75%. (EMBRAPA INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA, 1979, p. 27)¹⁰

As classes de declividade foram definidas no *Arcmap* pela rotina ***Propriedades*** → ***Simbologia*** → ***Classified*** → ***Manual***. Após esse processo de determinação das classes, esses *rasters* foram reclassificados através da rotina ***ArctoolBox*** → ***Spatial analysty tools*** → ***Reclassification*** → ***Reclass***.

Posteriormente, esses valores de declividade foram refinados, desconsiderando os pixels com valores destoantes dos demais. Tal procedimento foi executado a partir de uma janela de oito pixels utilizando a média por moda, como proposto por Valeriano (2008), através da rotina ***ArctoolBox*** → ***Spatial analysty tools*** → ***Generalization*** → ***Majority Filter***.

5.2.3.2 Hipsometria

O número de classes e os intervalos para a hipsometria, diferente da declividade, não têm uma prerrogativa de padrão para a sua distribuição em classes. Destarte, foram consideradas as colocações de Tavares (2007) sobre a distribuição e a classificação de grandes populações de dados, sustentando-se que o número de classes(*k*) é dado pelo produto de cinco vezes o logaritmo do número total de observações(*n*), dado pela fórmula 1.

$$k = 5 \times \log(n) \qquad \text{fórmula 1}$$

Onde:

k = número de classes

n = número de observações

Quando determinado o número de classes (*k*), é necessário determinar também os valores de amplitude das classes (*c*), utilizando a amplitude dos dados (*A*) (TAVARES, 2007) como demonstrado nas formulas 2 e 3.

$$A = n_{Lim\ Sup.} - n_{Lim\ Inf.} \qquad \text{fórmula 2}$$

Onde:

$n_{Lim\ Sup.}$ = Maior valor da amostra

$n_{Lim\ Inf.}$ = Menor valor da amostra

¹⁰ As classes de declividade ainda podem ser apresentadas também em graus, 3% equivale a 1,71836°, 8% corresponde a 4,57392°, 20% se compara a 11,30993°, enquanto que para 45% se tem 24,22775° por fim 75% é 36,8699°.

$$C = \frac{A}{(k-1)} \qquad \text{fórmula 3}$$

Onde:

A = Amplitude dos dados

K = número de Classes

Após determinados o número de classes (k) e seus intervalos (c) da hipsometria, ambos foram ajustados no *Arcmap* pela rotina **Propriedades**→**Simbologia**→**Classified**→**Manual**. Depois desse processo de determinação das classes, esses *rasters* foram reclassificados através da rotina **ArctoolBox** → **Spatial analysty tools** → **Reclassification** → **Reclass**.

5.2.4 Verificação das matrizes altimétricas dos MDE e Subprodutos

5.2.4.1 Verificação estatística dos MDE

A primeira etapa do processo de comparação foi composta pela investigação, célula a célula, das matrizes que formam ambos os MDE interpolados no ambiente MatLab. Tal procedimento dá possibilidade a um estudo comparativo entre as células, determinando as variações entre os modelos digitais de elevação e os métodos de interpolação aplicados.

Os testes estatísticos aplicados dividem-se em três tipos básicos: os de correlação, os de quantificação de erros e incertezas e os da qualidade visual de imagens. A primeira análise foi a de correlação com o teste de Correlação de Pearson.

Coefficiente da Correlação de Pearson (r). Viabiliza analisar qual a correlação linear entre uma variável A e outra B, permitindo comparar entre duas variáveis o quanto os MDE gerados a partir do ALOS-PALSAR – por meio de diversos interpoladores – é semelhante àquele gerado tendo como origem os produtos de resolução espacial maiores, provenientes do LIDAR.

Tal coeficiente pode variar de -1 a 1, posto que quanto mais próximo o seu resultado do módulo de 1, mais perfeita é a correlação linear. Obstante, o valor 0 significa que não há correlação entre os conjuntos de dados analisados (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009), porém os valores 1 e 0 são muito improváveis de ocorrer.

Verifica-se ainda a existência de diversas formas de classificação qualitativa para a interpretação dos resultados obtidos pela correlação de Pearson:

Para Cohen (1988), valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos; escores entre 0,30 e 0,49 podem ser considerados como médios; e

valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes. Dancy e Reidy (2005) apontam para uma classificação ligeiramente diferente: $r = 0,10$ até $0,30$ (fraco); $r = 0,40$ até $0,6$ (moderado); $r = 0,70$ até 1 (forte). (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009, p. 119)

Isso se explica pela característica dos resultados obtidos na Correlação de Pearson serem adimensionais, significando, de forma mais simples, que não é possível dizer que uma correlação de $0,3$ corresponde a 30% :

O coeficiente tem um caráter adimensional, ou seja, ele é desprovido de unidade física que o defina. Não faz sentido interpretar uma correlação de $0,3$ como sendo 30% , por exemplo. Além disso, ele não se refere à proporção. Logo, uma correlação de $0,4$ não pode ser interpretada como representando o dobro de uma correlação de $0,2$ (Chen e Popovic, 2002: 09). (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009, p. 119)

Sendo que o coeficiente de correlação linear de Pearson é obtido matematicamente pela fórmula 5:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad \text{fórmula 5}$$

Onde:

x_i = Valores das amostras x

\bar{x} = Média dos valores das amostras x

Y_i = Valores das amostras Y

\bar{Y} = Média dos valores das amostras y

Além do teste de correlação, foram aplicadas análises relativas à inferência espacial, a fim de medir a forma e composição das diferenças entre ambos os conjuntos de dados. Diante disso, foi necessária a aplicação de testes de erros capazes de representar as diferenças entre os valores estimados para o MDE ALOS-PALSAR interpolado, frente aos MDE de comparação do LIDAR.

Nesta perspectiva, foram aplicados três testes elementares da teoria de erros, para grandes conjuntos de dados: o **Erro Médio Absoluto** (EMA), o **Erro Médio Quadrático** (EMQ) e a **Raiz do Erro Quadrático Médio** (REMQ), os quais já se mostraram eficientes nas análises de dados espaciais para análises geográficas nos trabalhos de Quina (2019), Oliveira (2019) e Trindade (2018).

O **EMA** é capaz de mensurar a diferença média dos valores estimados (ALOS-PALSAR) em relação aos valores observados na amostra (LIDAR). Sobre a interpretação desse índice, Barbosa sustenta que “seu valor ideal seria igual a zero. Assim, o erro médio tende a ser

pequeno na medida em que os erros negativos e positivos se compensem” (BARBOSA, 2010, p. 25), tal avaliação é descrita pela fórmula 6:

$$EMA = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n |Vo - Vp|) \quad \text{fórmula 6}$$

Onde:

Vo = Valores originais

Vp = Valores previstos

n = Números de observações

Por seu turno, o **EMQ** possibilita verificar a diferença entre um determinado conjunto de valores estimados frente aos valores verdadeiros, que, no caso, são os obtidos pelo LIDAR. Na medida em que determina de modo consistente a capacidade de ajuste entre ambos os conjuntos de dados, quanto mais próximos de zero, melhores são os seus resultados comparativos, configurando-se como um dos mais populares testes na comparação de imagens digitais (DOURADO, 2014), podendo ser descrita matematicamente pela fórmula 7:

$$EMQ = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n (Vo - Vp)^2) \quad \text{fórmula 7}$$

Onde:

Vo = Valores originais

Vp = Valores previstos

n = Números de observações

O último teste aplicado foi a **Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQR)**, que simplificada consiste em tirar a raiz quadrada do erro médio quadrático. A aplicação desta avaliação, em síntese, devolve o resultado quantitativo da diferença entre a predição (MDE ALOS-PALSAR interpolados) e a medida tida como real (LIDAR) apresentada (OLIVEIRA, 2019). Quina (2019) ainda destaca a capacidade deste índice em fornecer informações sobre o grau de espalhamento dos dados quando comparado o estimador como o classificador. Tal equação pode ser descrita pela fórmula 8:

$$REMQR = \sqrt{\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n (Vo - Vp)^2)} \quad \text{fórmula 8}$$

Onde:

Vo = Valores originais

Vp = Valores previstos

$n = \text{Números de observações}$

5.2.4.2 Verificação da Declividade e da Hipsometria

Um dos maiores desafios na comparação da qualidade de imagens é que embora as validações estatísticas sejam importantes, não consideram a habilidade humana de percepção, seleção e análise, como diz Dourado (2014):

Um dos problemas encontrados nos resultados obtidos usando técnicas de processamento de imagem está na análise da qualidade por meios de medidas estatísticas. Isto ocorre pois muitas vezes os métodos utilizados não levam em conta a percepção humana e desta maneira não reflete exatamente como a informação é recebida e interpretada. A avaliação da qualidade de uma imagem digital é um assunto que ainda necessita de sofisticação em seus modelos matemáticos. (DOURADO, 2014, p. 72)

O autor ainda destaca a falta de estudos que sejam capazes de equacionar a “estrutura do sistema visual humano (do inglês *Human Visual System, HVS*) com as estruturas estatísticas (...) pois métodos puramente estatísticos não conseguem prever precisamente como o ser humano interpreta a informação visual.” (DOURADO, 2014, p. 72).

Essa limitação dos métodos de análises de imagens se torna uma barreira ainda maior sobre a análise de mapas temáticos. Normalmente, ao se trabalhar com estes elementos, se lida com informações imprecisas, haja vista a dificuldade de representar especificamente quando se inicia uma classe e termina outra. Tanto que normalmente são representadas por linhas finas referentes apenas a uma aproximação da realidade nas suas delimitações (CÂMARA; MEDEIROS, 2004). Neste sentido, promover uma análise simplesmente estatística em mapas temáticos pode gerar interpretações errôneas dos índices computados.

Nesta perspectiva, no que compete à análise de mapas temáticos, é mais adequado promover a avaliação da forma e distribuição dos agrupamentos de classes de informação. Cientes desse comportamento, as análises da declividade e hipsometria foram executadas de acordo com a qualidade de duas maneiras. A primeira, através da aplicação de um teste básico para mensurar a qualidade de imagens, seguida pela avaliação visual dos padrões de distribuição e organização das classes de informação.

Acerca da avaliação da qualidade da imagem, o teste aplicado nos mapas temáticos, foi o Structural Similarity (**SSIM**), que é utilizado para medir a semelhança entre duas imagens, comparando uma original e outra que pode ou não ter sofrido modificações, de maneira que quanto mais próximo de 1 o resultado, mais parecida são as imagens. O que diferencia o **SSIM** em relação aos outros testes qualitativos é o oferecimento de uma análise estrutural, a qual é

pautada nas características das imagens, considerando o agrupamento de pixels próximos e a sua similaridade uns com os outros na construção da imagem.

O teste em questão é capaz de simular a visão humana, que não busca somente calcular informações como os valores e posições exatas dos pixels na imagem, como demonstra Nascimento (2015):

Ainda que o PSNR seja amplamente utilizado, esse método é focado em encontrar diferenças entre pixels, enquanto o SSIM é baseado em variações na estrutura. Entretanto, a mente humana não processa informações simplesmente como números ou divisões tão pequenas quanto pixels. Ao olhar para uma imagem, o usuário busca informações completas, como formas e bordas, que se traduzem como estrutura. Utilizando o SSIM é possível comparar as imagens de forma semelhante à abordagem do olho humano. (NASCIMENTO, 2015, p. 37)

Na avaliação, o **SSIM** parte de três parâmetros básicos: o contraste (C); a estrutura (E); e a luminescência (L), os quais podem ser integrados para gerar o **SSIM** através da fórmula 10, com um resultado variando de -1 a 1, à medida que quanto mais próximo de 1 mais parecidas são as imagens.

fórmula 9

$$SSIM(V_o, V_p) = \frac{(2\mu_{V_o}\mu_{V_p} + C_1) + (2\sigma_{V_o V_p} + C_2)}{(\mu_{V_o}^2 + \mu_{V_p}^2 + C_1)(\sigma_{V_o}^2 + \sigma_{V_p}^2 + C_2)} \quad \text{Ou} \quad SSIM(V_o, V_p) = [L(V_o, V_p) \times C(V_o, V_p) \times E(V_o, V_p)]$$

$$L(I_o, I_a) = \frac{2\mu_{V_o}\mu_{V_p} + C_1}{\mu_{V_o}^2 + \mu_{V_p}^2 + C_1} \quad C(I_o, I_a) = \frac{2\sigma_{V_o}\sigma_{V_p} + C_2}{\sigma_{V_o}^2 + \sigma_{V_p}^2 + C_2} \quad E(I_o, I_a) = \frac{\alpha_{V_o V_p} + C_3}{\sigma_{V_o}\sigma_{V_p} + C_3}$$

Onde:

V_o = Valores originais

V_p = Valores previstos

σ = Variância

μ = Média

α = Covariância

Por outro lado, foram executadas também avaliações visuais para além de índices de qualidade estatísticos, na tentativa de fazer uso da faculdade humana de distinção de padrões, de formas, de continuidades e de descontinuidades. Dessa maneira, efetuou-se a avaliação de três parâmetros básicos: a **Forma**; as **Continuidades e Descontinuidades**; e os **Padrões**.

A avaliação visual da variável **FORMA** é realizada a partir do processo de comparação das formas de hipsometrias e da declividade geradas através dos MDE interpolados do ALOS-PALSAR frente ao LIDAR. Com isso, atende-se ao intuito de concluir se ocorre uma

semelhança geral e relativa entre as delimitações de suas formas e de seus limites. Promove-se, então, o exercício avaliativo de observar se essas diferenças de formas seriam capazes de induzir a errôneas interpretações.

Concomitantemente à avaliação da forma, ocorre a verificação da existência, ou não, das **CONTINUIDADES** e **DESCONTINUIDADES** representadas em ambas as temáticas de Declividade e Hipsometria – intencionando-se analisar a capacidade de representação das continuidades e descontinuidades de cada classe, bem como os possíveis erros recorrentes de cada método de interpolação dos MDE.

Ocorrendo corretamente a avaliação das formas e continuidades (ou descontinuidades), ao fim avaliam-se os **PADRÕES** gerais dos arranjos de erros e acertos que compõem cada temática. Desse modo, são alçadas as condições de responder ao questionamento quanto à adequação do uso dos MDE interpolados para melhores resoluções na construção de mapas temáticos sobre declividade e hipsometria.

5.2.5 Geração e verificação das formas por perfis de relevo

Por muito tempo a análise das vertentes foi ignorada pela Geomorfologia, tanto na Geografia, quanto na própria Geologia, pois ocorria uma tendência geral da utilização da concepção Davisiana (GREGORY, 1992). Porém o declínio de tal teoria geomorfológica, e a busca por novas abordagens, ainda em 1950-60, centrada na análise das dinâmicas da paisagem, propiciou que estudos pautados na perspectiva das vertentes voltassem à tona. Essa a qual passa a ser considerada como a unidade teórica básica para a análise geomorfológica, a qual é possível analisar as formas, processos e dinâmicas que compõem a paisagem.

De maneira que com a ascensão e popularização dos MDE, alinhadas as novas ferramentas de análise espacial, a aquisição e tratamento dos dados espaciais, as análises das vertentes, de maneira geral, passam a recorrerem a dados secundários. Porém nem sempre claramente discutidas as limitações destes dados na representação e análise do relevo e como podem gerar resultados inconsistentes com a realidade observada:

Porém, é necessário lembrar que os modelos digitais de elevação estão sujeitos a distorções. Conseqüentemente, os atributos topográficos derivados apresentam limitações e nem sempre traduzem as informações fidedignas do terreno, em função de um conjunto de fatores de interferência. As resoluções horizontais e verticais dos dados de elevação utilizados para retratar uma superfície de terreno têm influência significativa no detalhamento e na qualidade das representações (...) (NEUMAN; SILVEIRA; SAMPAIO, 2018, p. 180)

Ciente de tal problemática, diversos autores propõem uma análise da qualidade de MDE de acordo com a sua capacidade de representar os modelados, com auxílio de perfis de relevo (MARION; DOS SANTOS; HENDGES, 2015; NEUMAN; SILVEIRA; SAMPAIO, 2018). Cunha e Bacani (2019), Zanin et al (2017) e Teske et al (2014), dentro de tal perspectiva, promovem por sua vez uma comparação não de MDE propriamente, mas das informações extraídas deles, para as análises morfométricas, mapeamentos geomorfológicos e pedológicos. Fazendo uso de comparações de perfis gerados a partir de vários MDE e interpretações de acordo com os dados obtidos.

Porém, merecem destaque Marion, Santo e Hedges (2015) que ao promoverem uma análise comparativa entre perfis de relevo a partir de MDE com dados de diversas fontes (SRTM 30m, SRTM 90, Topodata, Levantamento Fotogramétrico, Curvas de nível do IBGE e etc.). Sustentando que para a área em questão foram os MDE SRTM e TOPODATA obtiveram o melhor resultado, mesmo que os MDE derivados de cartas topográficas possuíssem uma escala de dados originais melhor. Ambos os autores levantam a necessidade de analisar os interpoladores na geração dos modelos por meio das Cartas topográficas, haja vista que poderiam de alguma forma estar influenciando nos resultados.

O fato é que, uma análise de um MDE precisa ser totalizante, promovendo a **análise estatística** como feita em Miranda (2017), Viana (2017), Iorio et. al (2012), a **avaliação qualitativa de subprodutos** gerados pelos MDE como a elaborada por Quina (2019), finalizada na **averiguação das formas** de relevo são modificadas **através de perfis de relevo** vide Teske et al (2014), Marion, Santo e Hedges (2015) e Neuman, Silveira e Sampaio (2018).

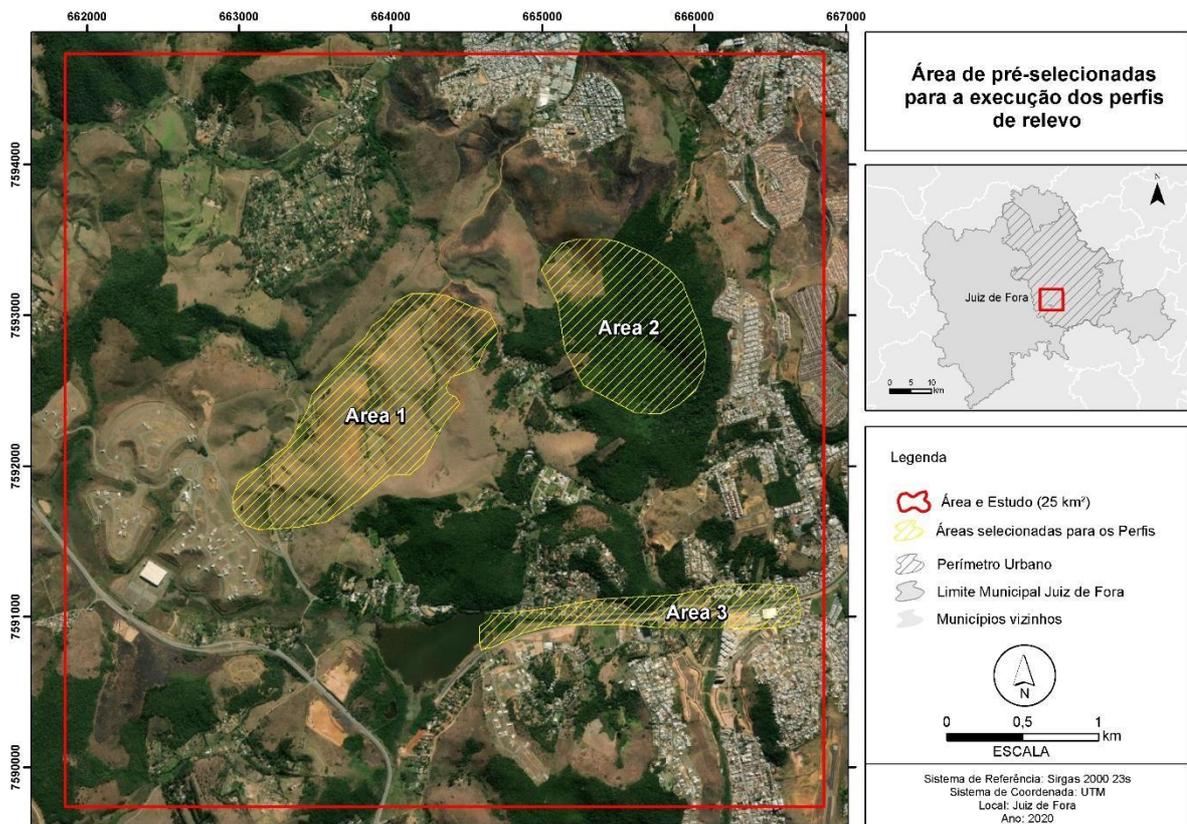
Dentro de tal concepção, finalizada a etapa de avaliação estatística dos MDE gerados pelos interpoladores analisados, a qual foi seguida pela análise qualitativa dos subprodutos de Hipsometria e Declividade, ocorre a necessidade de estabelecer a delimitação e análise de perfis de relevo na área de estudo.

5.2.5.1 Delimitação dos locais dos perfis de relevo

Inicialmente foram destacadas, através da avaliação de cartas topográficas e imagens de satélites, três áreas promissoras para executar os traçados de perfis de relevo (Figura 11) onde cada uma congregava diversas características únicas que propiciariam uma análise integrada de diversas formas e geometrias de vertentes, níveis de antropização do relevo e do uso e cobertura do solo.

A área 1 é marcada por uma composição morfológica de relevos bem dissecados, congregando tanto vertentes côncavas, convexas e retilíneas, que possibilitam a capacidade de verificar o comportamento dos interpoladores em diferentes geometrias de vertentes. Soma-se ainda o fato de possuir uma declividade relativamente elevada, auxiliando na capacidade de analisar os vários níveis de generalização na representação e transição em valores de declividade mais acentuados.

Figura 11 - Localização das áreas pré-selecionadas para a execução dos perfis de relevo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Porém, infelizmente a área 1 não possui uma cobertura significativa, haja vista que é predominantemente composta por pastagens. Tal realidade impossibilita verificar o possível comportamento do efeito dossel, descrito por Valeriano (2008) como um dos principais erros em MDE gerados por sensores aeroespaciais. Neste sentido destaca-se a área 2, na tentativa de estabelecer uma área de possível ocorrência do efeito dossel, pois está centrada em uma grande massa verde de vegetação arbórea densa, e ainda com uma boa variação de declividade. Por fim, ocorreu a necessidade de estabelecer uma área a fim de consagrar a avaliação por meio dos

perfis em relevos mais suaves, com o objetivo de compreender o comportamento dos MDE em áreas de planície. Necessidade sanada pela seleção da área 3 a qual possui uma capacidade de atender a essas demandas.

Todavia, devido a diversos fatores, dentre eles a pandemia (a qual inviabilizava a efetiva mobilização de equipes em campo) dificultou em parte, as plenas incursões a campo. Somando-se e o fato de algumas das áreas pré-selecionadas se encontrarem próximas a regiões dominadas por grupos armados, se optou pelo levantamento e análise de dois tipos de perfis a fim de cobrir a totalidade das áreas pré-selecionadas.

O primeiro tipo de perfil são os chamados de perfis virtuais, esses perfis foram traçados em ambiente GIS, os quais por meio da captura as altimetrias registradas nos MDE interpolados do ALOS-PALSAR (resoluções de 6m, 8m e 10m) e do LIDAR com a sua resolução espacial original de 1 m, foi executada uma comparação entre o material de maior nível de detalhe disponível de fontes secundárias a que se teve acesso e os MDE interpolados. Devido a facilidade de traçar e promover a análise destes perfis, foram traçados três grandes perfis em locais onde se julgou mais propícios a uma análise completa.

O segundo tipo de perfil é chamado de perfis reais, esses por sua vez foram medidos em campo através da utilização de aparelhos de GPS Geodésico de precisão centimétrica. O método de levantamento realizado foi o *stop and go* com uma distância entre cada ponto inferior a 4m entre si, gerando assim 3 perfis nas áreas pré-selecionadas 1 e 3 (Figura 11) não sendo possível fazer a medição na área de mata devido a sua proximidade com regiões dominadas por grupos armados, além da própria dificuldade destes equipamentos em operar em locais com vegetação arbórea densa.

5.2.5.3 Geração dos perfis virtuais

Com as áreas gerais delimitadas, foram estabelecidas as dimensões máximas de cada perfil variando de 0,6 km a 1,5 km. Essas dimensões específicas foram determinadas com o objetivo de os traçados dos perfis, ficarem contidos sempre no interior das áreas pré-selecionadas a uma distância para os limites das áreas pré-selecionadas de no mínimo 1 km. Foram traçados três perfis, cada um em uma das áreas pré-selecionadas: o perfil 1 possui 0,82 km de comprimento, o segundo perfil com o comprimento de 1,3 km e por fim o terceiro e último perfil possui 0,62 km (Figura 12).

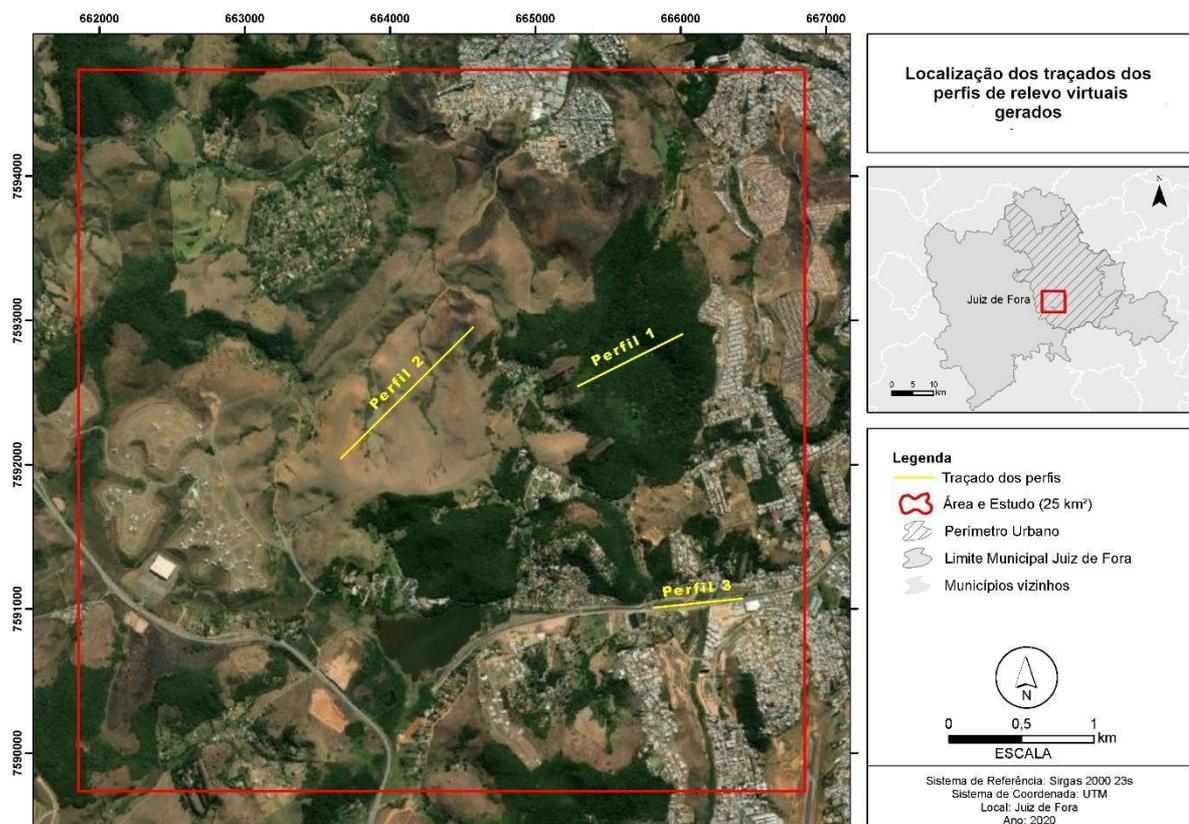
Os traçados dos perfis gerados em formato SHP no *ArcGis 10.3* em linha foram transformados para pontos, através da rotina *ArctoolBox* → *Data Management tools* →

Features → **Feature vértice to points**, que resultou em um novo arquivo .shp em formato ponto, delimitando pontos ao longo do traçado da linha dos perfis de relevo com 1m de equidistância.

E a partir destes pontos que representam o traçado do perfil, foram extraídos os valores altimétricos dos MDE interpolados do ALOS-PALSAR e LIDAR nas resoluções espaciais de 10m, 8m e 6m. Tal procedimento, tem o objetivo de coletar as informações de altimetria contidas nos MDE interpolados do ALOS-PALSAR em resoluções espaciais de 10m, 8m e 6m e dos MDE gerados com os dados originais do levantamento LIDAR com 1m de resolução espacial.

Tal processo de coleta das informações altimétricas dos MDE, ocorre por meio da inserção de todos os MDE interpolados e de parâmetro no ambiente GIS, os quais terão os seus valores de altimetria extraídos a partir da localização dos pontos que formam o perfil de relevo, através da rotina *ArctoolBox* → *Spatial analysty tools* → *Extraction* → *Extract Multi Values to Points*.

Figura 12 - Localização dos perfis virtuais traçados para a comparação dos MDE



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Ao final do processo, o resultado final é um SHP de pontos representando o traçado com os perfis de relevo, possuindo uma tabela de atributos com os valores altimétricos de todos os MDE interpolados e valores apresentados pelo levantamento LIDAR. A tabela de atributos, com esses dados é exportada para um arquivo extensão .xls pela rotina *ArctoolBox* → *Conversion tools* → *Excel* → *Table to Excel*.

Com essas informações planilhadas, os dados são abertos no Excel, onde são gerados diversos perfis de relevo na forma de gráficos de cada um dos MDE gerados de acordo com o método de interpolação, sobrepostos com as informações extraídas do MDE LIDAR com resolução espacial original de 1m, a fim de verificar visualmente as possíveis assimetrias na forma de representação do relevo do produto interpolados de materiais de menor resolução, frente a um material de alta resolução.

5.2.5.4 Medição dos perfis reais

Com a delimitação das áreas de execução dos perfis definidas, ocorreu o processo de medição em campo dos traçados dos perfis reais e de sua altimetria. Sendo definido o traçado de dois perfis na área pré-selecionada 1 e de um traçado feito na área pré selecionada 3, ambos os levantamentos executados através do método *stop and go* utilizando GPS Geodésico (Figura 13).

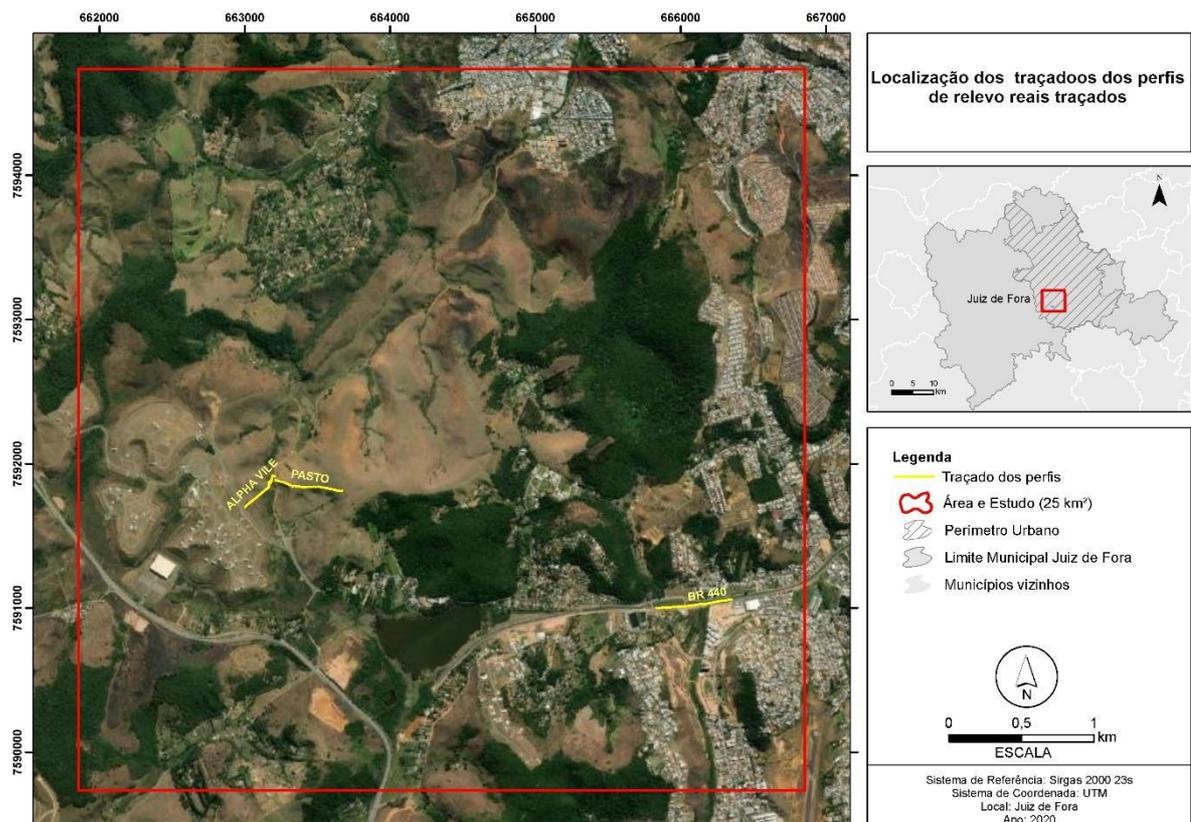
Basicamente, esse tipo de técnica consiste na utilização de dois aparelhos, no qual um fica fixo em um local durante todo o levantamento, enquanto que um segundo aparelho é levado em todos os pontos que é necessária a medição, realizando pequenas paradas nos pontos de maior interesse, com o cuidado para não ocorrer uma obstrução da base e do rover:

Este tipo de posicionamento consiste em transportar um receptor a todos os pontos que se queira observar, efetuando breves paradas (poucos segundos), nas posições de maior interesse. Uma época, a priori, permite determinar as coordenadas de cada estação. Já que o requisito básico deste método é que as ambiguidades sejam determinadas antes de se iniciar o posicionamento, o receptor deve ser transportado cautelosamente de maneira a não obstruir o sinal (SANTOS, 2017, p. 26).

Contudo, por mais que o método *stop and go* permita que o levantamento seja feito de forma rápida e precisa, ele não é aconselhado para locais com muitas obstruções físicas (INCRA, 2013), que podem resultar na perda de precisão do dados por multicaminhamento por exemplo, ou uma má distribuição na constelação de satélites no momento do levantamento gerando o que se chama de PDOP alto.

O processo de medição dos perfis de relevo reais ocorreu no dia 20 de julho de 2020, com a utilização de dois modelos de GPS, um modelo geodésico (L1/L2) e um GPS de precisão diferencial (L1). Para as bases foram usados dois equipamentos da empresa brasileira TECHGEO (L1/L2), que foram instaladas as margens da represa do São Pedro próximos a cota 0 do nível de base (Figura 14) configurados com intervalos de leitura mínima de 1 segundo, e com uma altura de 2m nas antenas dos receptores.

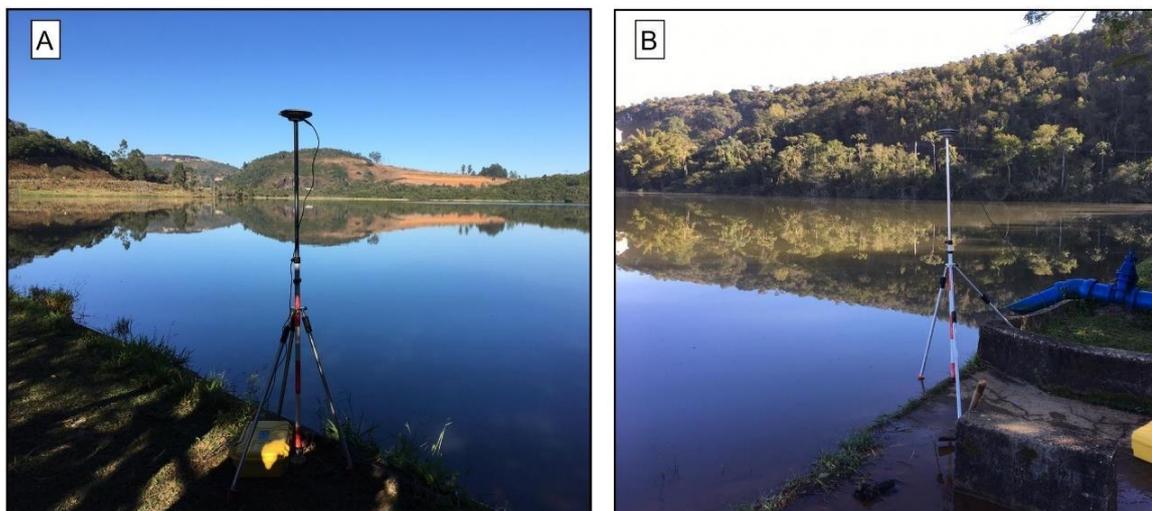
Figura 13 - Localização dos perfis reais medidos para a comparação dos MDE



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tal local para ocupação das bases se justifica pelo próprio comportamento que os grandes corpos d'água nos MDE. Estas áreas no processo de geração de modelos digitais de elevação são consideradas zonas "mortas", em outras palavras, teoricamente são superfícies homogêneas no interior dos modelos com a mesma altimetria. É possível ainda destacar a potencialidade desta área para as ocupações das bases, pelo seu entorno ser marcado por uma área sem grandes rugosidades ou outros corpos sobre o terreno, fator que evita a ocorrência de ruídos ou a perda de comunicação com a constelação de satélites.

Figura 14 - Localização das bases usadas no levantamento dos perfis reais traçados para a comparação dos MDE



Fonte: Acervo do autor (2021).

Por sua vez, para o processo de levantamento dos três perfis reais (Figura 13), foram usados três GPS da fabricante ASHTECH Solutions, (L1), ambos configurados para um tempo ocupação nos marcos de 20 segundos e instalados com uma antena com 2m de altura.

Com os dados já levantados em campo, as informações foram encaminhadas ao laboratório para o trabalho de pós- processamento, na tentativa de estabelecer tanto um alto padrão de precisão e mensurar se os valores dos sigmas de cada marco no levantamento. Todo o trabalho de pos-processamento dos dados levantados em campo, foi realizado em dois programas especializados, já que foram usados dois tipos de aparelhos de GPS para a execução do levantamento como já mencionado anteriormente (aparelhos TECHGEO para bases e ASHTECH Solutions para os Rover's).

Primeiramente para iniciar o pós-processamento dos dados, promoveu-se o ajuste das bases por meio do *software* GTR PROCESSOR da empresa TECHGEO, uma vez que para as bases foram usados aparelhos deste mesma fabricante. O primeiro passo neste programa, é promover o ajuste das coordenadas da base por meio do sistema de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), o qual basicamente consiste em um:

(...)serviço online gratuito para o pós-processamento de dados GNSS (Global Navigation Satellite System), que faz uso do programa CSRS-PPP (GPS Precise Point Positioning) desenvolvido pelo NRCan (Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada). Ele permite aos usuários com receptores GPS e/ou GLONASS, obterem coordenadas referenciadas ao SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) e ao ITRF (International Terrestrial Reference Frame) através de um processamento preciso. O IBGE-PPP processa dados GNSS (GPS e

GLONASS) que foram coletados por receptores de uma ou duas frequências no modo estático ou cinemático. (...) É necessário apenas que o usuário informe o arquivo de observação no formato RINEX ou HATANAKA, se o levantamento foi realizado no modo estático ou cinemático, o modelo e a altura da antena utilizada, e um e-mail válido. Ao final do processamento será disponibilizado um link para obtenção dos arquivos com os resultados. (IBGE, [s.d.]

De maneira que para a geração do PPP, é necessário carregar os arquivos das bases (formato. PDC) no GTR PROCESSOR, pela rotina **Observações** → **Importar** → **arquivo da base .PDC**. Após devidamente carregada no programa é preciso exportá-la para o formato universal GPS *RINEX*, o qual é necessário carregá-lo em formato .zip no diretório do sistema de “Processamento por Ponto Preciso (PPP)” do IBGE (<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=processar-os-dados>) que retorna relatórios dos novos valores das coordenadas de ambas as bases já ajustadas, considerando as ambiguidades do dia do levantamento.

Com os valores das bases ajustadas em mãos, é preciso carregar o arquivo RINEX das bases, pela rotina **Projeto** → **Importar dados puros de ficheiro ou Promark 5000** no programa GNSS Solutions 2.7, onde ocorre o ajuste dos valores das coordenadas de acordo com os resultados apresentados no relatório PPP, obtido no site do IBGE. Com as bases carregadas e ajustadas, em seguida é necessário inserir os dados brutos do levantamento dos perfis traçados pelos *rover's*, com a rotina, rotina **Projeto** → **Importar dados puros de ficheiro ou Promark 5000** indicando a altura e tipo de antena usada no receptor.

Por fim com os valores das bases corrigidos, os pontos do traçado dos perfis inseridos no programa, assim como as informações de antenas e alturas corretamente indicadas, iniciam-se o pós-processamento dos dados, através da rotina **Projeto** → **Processar todas as baselines**. Neste momento, caso após o processamento ainda ocorra o caso de pontos que não tenham fixados, é possível promover o processo de mascarar os satélites que no momento do levantamento não apresentam uma boa troca de informações, e por isso, podem estar prejudicando a acurácia dos cálculos do processamento.

Esse processo de ajuste é realizado pela rotina **Projeto** → **Opções de processamento** → **Máscara**, onde o usuário pode observar quais são os momentos do levantamento que a recepção de sinal ficou mais inconstante, e assim mascará-las para que sejam desconsideradas no processamento. Após esse processo de ajuste é necessário executar mais uma vez o processamento dos marcos pela rotina **Projeto** → **Processar todas as baselines**.

Finalizado o processamento dos marcos, é preciso exportar as novas coordenadas e altitudes para um arquivo de texto para a posterior inserção no ambiente GIS. Esse processo é executado pela rotina *Projeto* → *Exportar Dados Geo para Ficheiro*, onde ocorre a escolha de quais informações do processamento dos marcos serão exportadas em um arquivo de texto extensão .txt. De acordo com os objetivos em questão desta dissertação, foram selecionadas as informações: Id do ponto; Este; Norte; Alturas ortométricas.¹¹

Com o arquivo extensão .txt, resultado do processamento dos pontos levantados em campo gerado, foi inserido no ambiente do *ArcMap10* pelo comando “**Add from Data**”, onde ainda no ambiente *ArcMap10*, esses dados em texto foram transformados em vetores, do tipo ponto, pelo comando “**Display XY Data ...**”, resultando na criação de um shapefile (SHP) que possuía uma tabela de atributos com os valores altimétricos registrado pelo GPS, demarcando todo o traçado do perfil medido em campo.

E a partir destes pontos, que representam o traçado do perfil em campo com suas altimetrias, são extraídos os valores altimétricos dos MDE interpolados do ALOS-PALSAR nas resoluções espaciais de 10m, 8 m e 6 m. Tal procedimento, tem o objetivo de coletar as informações de altimetria contidas nos MDE interpolados. Objetivando a posterior geração dos perfis de relevo destes MDE para a comparação com os valores medido em campo com os aparelhos GPS.

Tal processo, ocorre por meio da inserção de todos os MDE interpolados no ambiente GIS, os quais terão os seus valores de altimetria extraídos a partir da localização dos pontos que formam o perfil de relevo medido com o aparelho GPS, através da rotina *ArctoolBox* → *Spatial analysty tools* → *Extraction* → *Extract Multi Values to Points*.

Ao final do processo, o resultado é um SHP de pontos representando todo o traçado dos perfis de relevo, com uma tabela de atributos com os valores altimétricos de todos os MDE interpolados e valores medidos em campo. Esses dados são exportados para um arquivo de extensão .xls pela rotina *ArctoolBox* → *Conversion tools* → *Excel* → *Table to Excel*.

Com essas informações planilhadas, os dados são abertos no Excel, onde são gerados diversos perfis de relevo na forma de gráficos, referentes a cada um dos MDE gerados de acordo com o método de interpolação, sobrepostos com as informações de altimetria extraídas do

¹¹ Para mais informações acerca do processamento de dados de GPS e a parte teórica conceitual vide: ROCHA, César Henrique Barra. **Geomática na prática**. 1 ed. São Paulo: Editora CRV, 2019. 296 p. ISBN: 9788544431139, DOI: 10.24824/978854443113.9.

levantamento de campo. Possibilitando a verificação das possíveis assimetrias na forma de representação do relevo do produto re-interpolados de matérias de menor resolução.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 OS RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ALTIMÉTRICA DOS MDE E SUBPRODUTOS COM RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 10M.

A primeira sequência de análise foi executada nos MDE e subprodutos gerados em uma resolução espacial de 10m. O resultado foi a criação de 12 MDE, referentes a cada um dos métodos de interpolação analisados (IDW fixo, IDW variável, Krigagem Ordinária Circular, Krigagem Ordinária Exponencial, Krigagem Ordinária Gaussiana, Krigagem Ordinária Linear, Krigagem Ordinária Esférica, Krigagem Universal Linear, Krigagem Universal Quadrática, Spline Regularizado, Spline Tensionado e Vizinho Natural) além do MDE parâmetro para comparação, derivado do LIDAR.

Os valores mínimos de altimetria entre os MDE interpolados do ALOS-PALSAR tiveram como menor valor 685,8 m, variando para mais em até 1 m entre si. Já entre os valores maiores, a cota máxima foi de 998,1 m, variando para menos em até 1,3 m (Quadro 1). Ocorre, então, uma boa semelhança entre tais valores e aqueles registrados no MDE de 10m de resolução, gerados a partir do LIDAR, os quais possuem como cotas mínimas e máximas respectivamente 686 m e 996 m.

No que tange aos coeficientes de correlação e de determinação, todos os métodos de interpolação mostraram forte semelhança quando comparados com o MDE LIDAR de resolução espacial de 10m. Como já destacado anteriormente, sobre as considerações de Miranda (2017), isso se deve ao grande número de amostras que sustenta uma tendência de desempenho equivalente entre os interpoladores. Contudo, mesmo assim, as mínimas diferenças entre os resultados de correlação de acordo com os métodos de interpolação possibilitam a observação de certos padrões de comportamento inerentes a determinados tipos de interpoladores.

Entre os coeficientes de determinação e de correlação, os menores valores são aqueles referentes ao método de interpolação pela Krigagem Gaussiana (Quadro 1). Isso porque, entre as Krigagens, tal método tende a normalizar as superfícies suavizando-as, e conseqüentemente, levando-as a apresentar espacialmente uma sequência contínua de valores da altimetria diferente do MDE de controle (LIDAR), fazendo a sua correlação ser a menor entre todos os métodos analisados.

No entanto, Gomes, Caraméz e Zaidan (2019) observaram, em comparação semelhante à executada nesta pesquisa que, entre os métodos de Krigagem, a Gaussiana representava as

menores variações percentuais entre as altimetrias do ALOS-PALSAR e LIDAR, em uma resolução espacial de 10m, em uma área um pouco menor de 16 km².

À primeira vista, parece ocorrer uma divergência inconciliável entre as considerações. No entanto, de forma alguma estas são necessariamente excludentes entre si. Isso pois embora se tenha observado em Gomes, Caraméz e Zaidan (2019) um menor valor relativo entre as diferenças altimétricas do LIDAR e ALOS-PALSAR, em relação à aplicação da Krigagem Gaussiana, essas diferenças não foram calculadas de forma absoluta, referente ao número total de variações observadas.

Em decorrência disso, mesmo que em termos relativos à diferença altimétrica, a interpolação por Krigagem Gaussiana se mostra a melhor. É provável que o número absoluto de pontos com alguma diferença seja maior frente ao número total da população de dados.

Quadro 1 - Índices estatísticos resultado da comparação dos MDE gerados por cada método de interpolação nos dados do ALOS-PALSAR em relação ao LIDAR. Ambos na resolução espacial de 10m

MDE 10metros							
Método	Min	Max	Coefficiente de Determinação	Coefficiente da Correlação de Pearson	Erro Médio Absoluto	Erro médio quadrático	Raiz do Erro Quadrático Médio
<i>IDW fixo</i>	686,6m	997,6m	0,99275	0,99638	4,34m	34,26m ²	±5,85m
<i>IDW variável</i>	686,3m	997,8m	0,99286	0,99644	4,31m	33,84m ²	±5,82m
<i>Krigagem Ordinária Circular</i>	686,0m	998,0m	0,99283	0,99645	4,31m	33,71m ²	±5,81m
<i>Krigagem Ordinária Exponencial</i>	686,0m	998,0m	0,99283	0,99645	4,31m	33,71m ²	±5,81m
<i>Krigagem Ordinária Gaussiana</i>	686,8m	996,8m	0,99270	0,99638	4,34m	34,30m ²	±5,86m
<i>Krigagem Ordinária Linear</i>	686,7m	997,6m	0,99283	0,99645	4,31m	33,71m ²	±5,81m
<i>Krigagem Ordinária Esférica</i>	686,0m	998,0m	0,99283	0,99645	4,31m	33,71m ²	±5,81m
<i>Krigagem Universal linear</i>	686,0m	998,0m	0,99277	0,99642	4,32m	33,97m ²	±5,83m
<i>Krigagem Universal Quadrática</i>	686,0m	998,0m	0,99284	0,99646	4,30m	33,68m ²	±5,80m
<i>Spline Regularizado</i>	685,9m	998,1m	0,99282	0,99645	4,31m	33,73m ²	±5,81m
<i>Spline Tensionado</i>	685,9m	998,1m	0,99283	0,99645	4,31m	33,72m ²	±5,81m
<i>Vizinho Natural</i>	686,1m	998,0m	0,99314	0,99661	4,19m	32,25m ²	±5,68m
Max	686,8m	998,1m	0,99314	0,99661	4,34m	34,30m²	±5,86m
Min	685,9m	996,8m	0,99270	0,99638	4,19m	32,25m²	±5,68m

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Assim como as análises de Correlação e de Determinação verificam toda uma população de dados, é possível compreender que sejam superiores a ocorrência de valores dessemelhantes, com relação ao número total de amostras. O que, conseqüentemente, elevaria as diferenças entre os conjuntos de dados, causando valores de Correlação e de Determinação menores para a Krigagem Gaussiana.

Já o método de interpolação com os melhores resultados nos testes de Correlação e de Determinação entre os MDE (para a resolução espacial de 10m) foi o interpolador do Vizinho Natural. Este método também foi capaz de registrar os menores valores no que concerne aos testes de EMA, EQM e REMQ (Quadro 1). Essa superioridade com relação à conformidade dos dados gerados pelo método do Vizinho Natural na resolução espacial de 10m, pode ser explicada em função de dois motivos: a resolução espacial dos dados de entrada e o próprio funcionamento desse método.

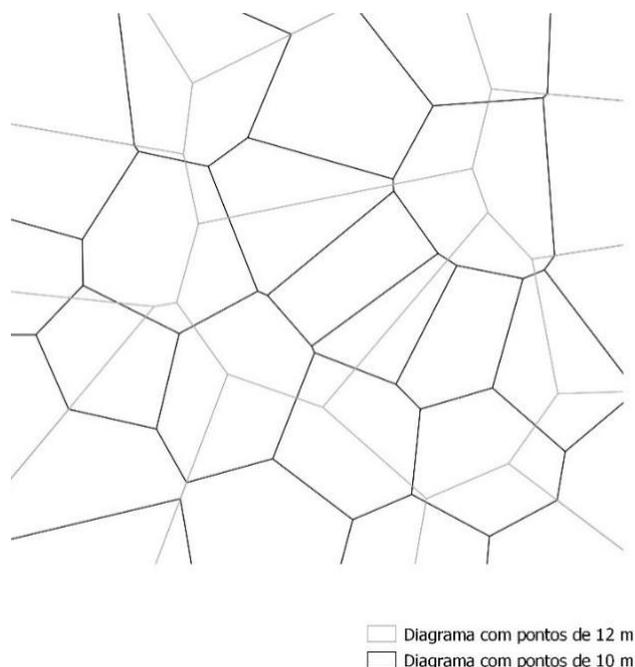
Inicialmente, os produtos do ALOS-PALSAR obtidos com uma resolução espacial original de 12,5m de resolução foram interpolados para uma resolução espacial de 10m, o que, em termos gerais, não representa um aumento tão expressivo na resolução espacial. Dessa maneira, qualquer um dos interpoladores, quando empregados no objetivo de definir o valor de um ponto desconhecido para uma resolução espacial mais próxima à do produto original, apresentaria incerteza menor quanto aos valores de suas inferências.

Porém, o fato de o método de Vizinho Natural ser um estimador local (MATOS, 2005), utilizando apenas valores locais para determinar os pontos desconhecidos, possibilita-lhe uma melhor abordagem em interpolações para pequenas melhorias no que se refere à resolução espacial. Isto porque as áreas de influência dos pontos amostrais de valor conhecido, sofreriam apenas uma “pequena expansão” para determinar aqueles novos valores gerados na melhoria da resolução do MDE, sem a interferência em seus valores de toda a população de dados.

Em outras palavras, por conta de o Vizinho Natural usar apenas os valores dos pontos amostrais, sem a aplicação de normalizações por meio de médias, seus valores não seriam influenciados por toda a população de dados. Soma-se ainda o fato de que nessas circunstâncias as áreas de influência delimitadas pelo diagrama de Voronoy a partir dos pontos amostrais de valores conhecidos, e o diagrama de Voronoy gerado com valores de pontos conhecidos e desconhecidos, seriam muitos similares.

A figura 15 ilustra tal situação, na qual dois diagramas de Voronoy sobrepostos, em que os pontos amostrais do primeiro (em cinza) têm uma distância entre si de 12,5m e que o segundo ponto com distâncias de 10m (em preto). É possível observar que ocorre uma semelhança entre o limite das áreas de polígonos menores (em preto) circunscritos em maior parte dentro de um dos polígonos maiores em que estão sobrepostos (em cinza).

Figura 15 - Esquema ilustrativo da diferença entre os diagramas gerados por pontos de valor conhecidos (linha cinza) e com todos os pontos de valor conhecidos ou não (linha preta)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Nota-se também que aqueles polígonos que não estão contidos inteiramente dentro de um polígono maior (em cinza), tendem a distribuir majoritariamente sua área sobre um único polígono maior (em cinza), dando a ele um maior peso relativo na inferência de valores do polígono menor (em preto).

Dentro das possibilidades, no que se refere aos interpoladores testados, a fim de melhorar o MDE de uma resolução espacial de 12,5m para uma resolução espacial de 10m, o método de Vizinho Natural se configurou como o interpolador mais adequado, no que tange os índices de avaliação estatística empregados na análise nesta área de estudo.

6.1.1 Os subprodutos dos MDE de 10m: Avaliação qualitativa da hipsometria e Declividade

As observações referentes aos subprodutos (declividade e hipsometria) gerados por meio dos MDE interpolados para a resolução espacial de 10m demonstram uma similaridade muito forte entre todos esses materiais. Essa asserção é possível a partir do processo de generalização causado pela reamostragem das informações em intervalos de classe, que

consegue suavizar de forma significativa as diferenças entre a hipsometria e declividade, independente dos métodos de interpolação aplicados.

A forma de ajuste das informações de declividade são um claro exemplo de como o processo de reamostragem dos dados em intervalos de classe provoca uma aparente semelhança visual no que se refere à sua interpretação.

Em termos quantitativos, as variações de declividade (figura 16) em graus entre os produtos gerados a partir dos MDE do ALOS-PALSAR, quanto aos maiores valores registrados, variam entre si cerca de 7°, com o menor valor na casa dos 45,5° e o maior registrado com 52,4°. Se forem realizadas comparações incluindo os valores da declividade gerada por meio do MDE do LIDAR, as diferenças são ainda mais expressivas. Isso porque a declividade gerada através do MDE do LIDAR sustenta como valor máximo 62°, estabelecendo uma diferença de cerca de 16,5° entre o menor valor de declividade dos MDE do ALOS-PALSAR e de 9,6° para o maior valor (Quadro 2).

Todavia, geralmente para as análises de declividade é usado os intervalos de classe da estabelecidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1979), a qual considera em uma única classe aqueles valores acima de cerca 36° definindo-os como escarpados. Assim, por meio de tal generalização, faz-se com que não sejam delineadas diferenças nos valores máximos de declividade nos mapas temáticos de usam esse fatiamento de classes.

Ainda que comumente autores considerem além das seis classes estabelecidas pela EMBRAPA (1979), a classe de 45° (100% de declividade), como esse valor de classe ainda é inferior ao menor valor computado entre os maiores índices de declividade, tal mudança não resultaria propriamente em uma modificação na delimitação das áreas de cada classe de declividade propriamente dita.

É observado, por sua vez, um fraco desempenho dos MDE ALOS-PALSAR para delimitar aquelas áreas de relevos planos (até 3% de declividade ou cerca de 1,7°) e as de relevos suaves ondulados (até 8% de declividade ou cerca de 4,6°), constatando potenciais insuficiências entre os modelos interpolados.

Desta forma, enquanto os MDE gerados por meio do LIDAR são capazes de registrar as diferenças entre os microrelevos de forma mais homogênea, resultando em uma delimitação mais consistente destes intervalos de classes, todos os produtos do ALOS-PALSAR passam a delimitar as duas classes de forma fragmentada, onde uma classe se confunde com a outra (figura 13)

Quadro 2 - Valores máximos de declividade encontrados em cada MDE de acordo com método de interpolação aplicado nos dados do ALOS-PALSAR, e o índice de similaridade das imagens (SSIM) gerado pela declividade e hipsometria frente as geradas pelo LIDAR, Ambos em resolução espacial de 10m

DECLIVIDADE MDE 10m				HIPSOMETRIA MDE 10m	
Método	min	Max	SSIM - Structural similarity	Método	SSIM - Structural similarity
<i>IDW fixo</i>	0°	48,91°	0,93147	<i>IDW fixo</i>	0,99186
<i>IDW variável</i>	0°	50,96°	0,93020	<i>IDW variável</i>	0,99191
<i>Krigagem Ordinária Circular</i>	0°	51,64°	0,92964	<i>Krigagem Ordinária Circular</i>	0,99194
<i>Krigagem Ordinária Exponencial</i>	0°	51,64°	0,92964	<i>Krigagem Ordinária Exponencial</i>	0,99194
<i>Krigagem Ordinária Gaussiana</i>	0°	46,17°	0,93169	<i>Krigagem Ordinária Gaussiana</i>	0,99191
<i>Krigagem Ordinária Linear</i>	0°	51,64°	0,92964	<i>Krigagem Ordinária Linear</i>	0,99194
<i>Krigagem Ordinária Esférica</i>	0°	51,64°	0,92964	<i>Krigagem Ordinária Esférica</i>	0,99194
<i>Krigagem Universal linear</i>	0°	45,47°	0,93246	<i>Krigagem Universal linear</i>	0,99194
<i>Krigagem Universal Quadrática</i>	0°	51,33°	0,92956	<i>Krigagem Universal Quadrática</i>	0,99195
<i>Spline Regularizado</i>	0°	52,42°	0,92861	<i>Spline Regularizado</i>	0,99194
<i>Spline Tensionado</i>	0°	52,12°	0,92886	<i>Spline Tensionado</i>	0,99194
<i>Vizinho Natural</i>	0°	51,21°	0,93045	<i>Vizinho Natural</i>	0,99219
Max	0°	52,42°	0,93246	Max	0,99219
Min	0°	45,47°	0,92861	Min	0,99186

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Se nos valores mais baixos das classes de declividade, ocorre um claro problema de delimitação, isso não é observado no limite inferior da classe posterior, que marca os relevos fortemente ondulados. A linha que demarca o limite inferior e superior da classe é consistente entre todas as declividades geradas pelos MDE interpolados do ALOS-PALSAR, além de em termos gerais também estarem representadas de forma semelhante na declividade gerada com dados do LIDAR (figura 16).

Finalmente, as últimas duas classes superiores de declividade, respectivamente relevos montanhosos (até 75% de declividade ou cerca de 37°) e escarpados (ou maiores que 75% de declividade, ou seja, superior a 37°) geradas a partir do ALOS-PALSAR também tem um comportamento semelhante quanto à distribuição.

No entanto, quando ocorre a comparação com os dados de declividade gerados pelo MDE do LIDAR, é latente que os valores superiores de declividade são subestimados nos subprodutos do ALOS-PALSAR. O LIDAR vai demonstrar áreas mais extensas de relevos considerados montanhosos, os quais avançam sobre a classe de relevos fortemente ondulados (figura 16).

Por mais claras que sejam as distinções entre ambas as declividades, os comportamentos do LIDAR e do ALOS-PALSAR são interessantes. Mesmo que o LIDAR, na sua carta de declividade, tenha a representação de áreas maiores e contínuas dos valores superiores de

declividade, o que não ocorre no ALOS-PALSAR, a distribuição geral dos grandes polígonos das classes são semelhantes em todas as informações de declividade dos MDE gerados por meio do ALOS-PALSAR. Resultando assim, mesmo com as diferenças apontadas, um SSIM médio na casa dos 0,93 (Quadro 2). Salienta-se assim, que embora haja diferenças entre os modelos que reverberam em certo grau para as informações de declividade, essas são compensadas pelas generalizações promovidas na aplicação dos intervalos de classes.

Porém, convém ter cuidado na utilização de tais materiais interpolados para resoluções espaciais maiores, uma que caso seja do interesse do estudo a utilização de valores discretos das declividades de determinada área é necessário que se tenha em mente os ruídos que estarão presentes nos resultados finais das análises que se pautarem sobre esses dados.

Isso pois se em um primeiro momento aparentemente em relação a graus uma variação entre 7° e 16° graus é relativamente pouco expressiva aos olhos de um pesquisador pouco experiente, em uma análise rápida entendendo que os valores percentuais de declividade não são lineares, a conversão de tais assimetrias para valores percentuais demonstra, que a escolha de um método ou outro pode contribuir para um acréscimo e/ou decréscimo dos valores de declividades superiores à 29% (Quadro 3).

Quadro 3 - Comparativo entre a diferença entre os valores máximos de declividade e termos absolutos em graus e relativos de porcentagens MDE com resolução de 10m

DECLIVIDADE MDE 10m				
Método	Valor Máx ALOS-PALSAR	Valor Max LIDAR	Diferença em graus	Diferença em percentual
<i>IDW fixo</i>	48,91°	62,05°	13,14°	23,3%
<i>IDW variável</i>	50,96°	62,05°	11,09°	19,6%
<i>Krigagem Ordinária Circular</i>	51,64°	62,05°	10,41°	18,4%
<i>Krigagem Ordinária Exponencial</i>	51,64°	62,05°	10,41°	18,4%
<i>Krigagem Ordinária Gaussiana</i>	46,17°	62,05°	15,88°	28,4%
<i>Krigagem Ordinária Linear</i>	51,64°	62,05°	10,41°	18,4%
<i>Krigagem Ordinária Esférica</i>	51,64°	62,05°	10,41°	18,4%
<i>Krigagem Universal linear</i>	45,47°	62,05°	16,58°	29,8%
<i>Krigagem Universal Quadrática</i>	51,33°	62,05°	10,72°	18,9%
<i>Spline Regularizado</i>	52,42°	62,05°	9,63°	17,0%
<i>Spline Tensionado</i>	52,12°	62,05°	9,93°	17,0%
<i>Vizinho Natural</i>	51,21°	62,05°	10,84°	19,1%
Max	52,42°	62,05°	16,58°	29,8%
Min	45,47°	62,05°	9,63°	17,0%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No que se refere às classes de hipsometria (figura 17), a semelhança é ainda maior do que a apresentada pela declividade, isso principalmente pelo cálculo de declividade, necessariamente se utilizar da diferença entre os valores de células vizinhas e a sua distância para estabelecer seu valor, o que indiretamente resulta em uma análise cruzada dos dados. De

modo adverso, a hipsometria vai se valer apenas do fatiamento das classes conforme o valor de cada célula individualmente, sem necessariamente verificar os valores entre células circundantes. Isso configura uma semelhança e conformidade muito maior entre os dados, já que as possíveis diferenças entre uma célula e outra não influenciam os valores das que a circundam.

Isso faz com que enquanto o SSIM da declividade era de aproximadamente 0,92, já considerado muito alto, o SSIM da hipsometria chega à casa dos 0,99 com uma semelhança quase perfeita entre o ALOS-PALSAR e LIDAR, independentemente do método de interpolação.

As principais diferenças demonstradas entre as hipsometrias dos MDE interpolados do ALOS-PALSAR e do LIDAR se encontram presentes na forma como são representadas as áreas de transição de uma classe para outra em ambas as cartas temáticas de hipsometria. Na hipsometria derivada do MDE do LIDAR, os limites entre classes aparecem de forma mais recortada e detalhada, isso principalmente por ter como origem um MDE de maior resolução e assim possuir maior capacidade de detalhar as formas da área.

Por outro lado, as hipsometrias dos produtos do ALOS-PALSAR têm os limites entre suas classes delimitadas de forma mais suave com menos detalhamentos se comparadas com os produtos do LIDAR. Isso é resultado do produto original que derivou essas informações de hipsometria do ALOS-PALSAR, tem uma escala espacial menor que não computou certos detalhes do relevo (figura 17), que por sua vez os interpoladores também não são capazes de compensar essa deficiência dos dados originais, na geração dos novos MDE.

No entanto, tais distinções entre as hipsometrias não resultam em diferenças significativas das informações e análises do relevo que podem ser executadas usando essas cartas temáticas, quando generalizadas por intervalos de classe, pois são modificações muito sutis e pontuais (figura 17).

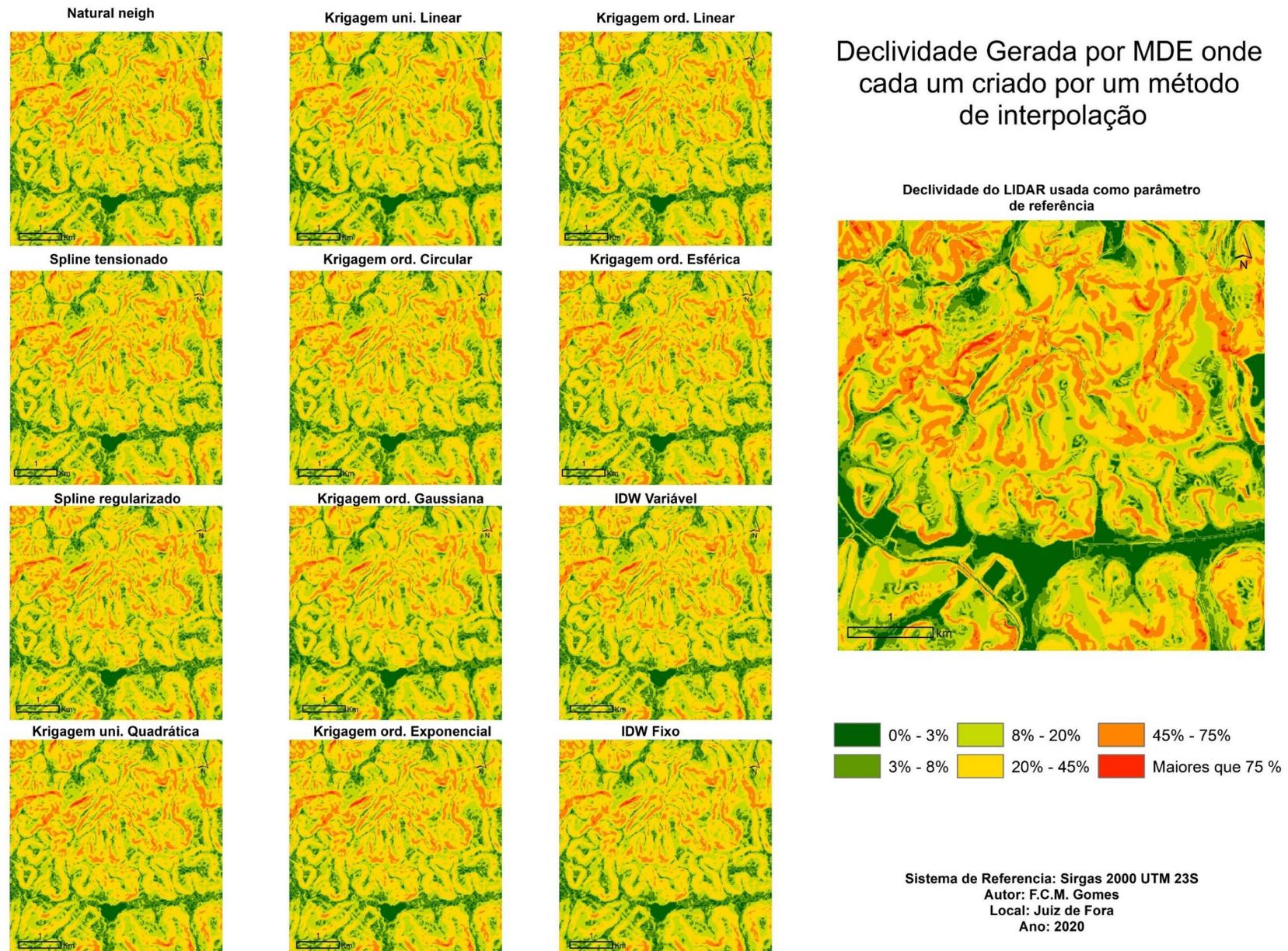
Pode-se então sustentar, quanto à conformidade de caráter qualitativo dos subprodutos gerados pelos MDE do ALOS-PALSAR, que independentemente do método de interpolação, ocorre um bom ajuste dos dados gerados quando comparado àqueles gerados com um produto originalmente de melhor resolução espacial proveniente do LIDAR, mas reamostrado para a resolução espacial de 10m.

Isso ocorre principalmente por conta da generalização promovida pela classificação dos dados em intervalos de classes que conseguem, em certa medida, suavizar as diferenças entre ambos os modelos para a resolução espacial de 10m. Dessa maneira, como esses intervalos de classe normalmente são usados para promover análises ambientais em geral, por meio da

técnica de álgebra de mapas, por exemplo, é validada a utilização dos interpoladores na tentativa de melhorar os MDE.

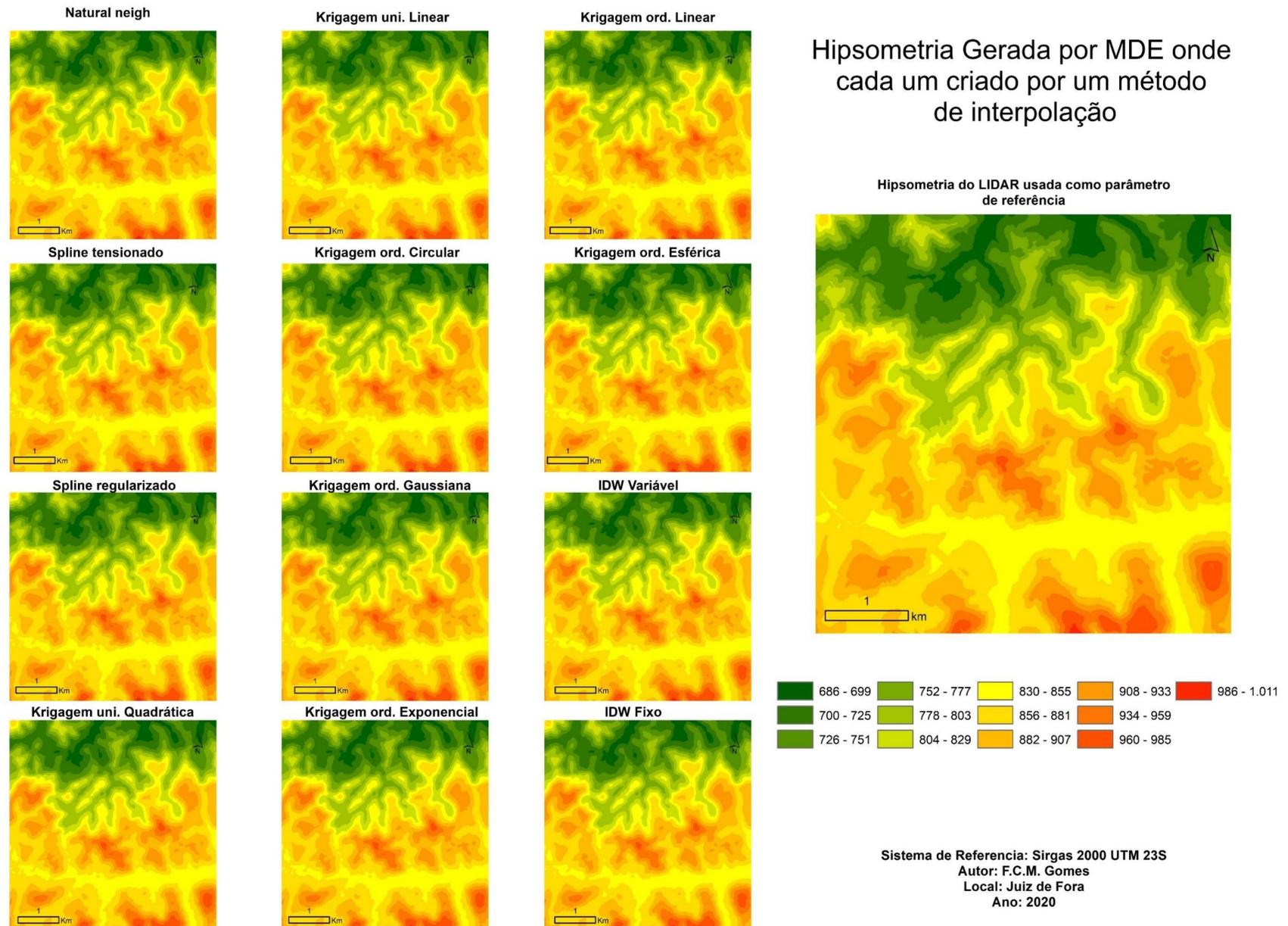
Contudo, se o interesse do pesquisador for além de utilizar as cartas temáticas generalizadas pelos intervalos de classes, buscando o uso dos valores discretos absolutos pontuais dentro da área de estudo, é necessário cumprir a responsabilidade de não buscar interpoladores que possuam a capacidade de subestimar os dados, como o caso do IDW Fixo, Krigagem Gaussiana ou Linear.

Figura 16 - Declividade gerada por meio dos MDE gerados de acordo com cada método de interpolação a partir dos dados do ALOS-PALSAR com resolução espacial de 10m e do MDE base para a comparação gerado pelo LIDAR também com resolução espacial de 10m



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 17- Hipsometria gerada por meio dos MDE gerados de acordo com cada método de interpolação a partir dos dados do ALOS-PALSAR com resolução espacial de 10m e do MDE base para a comparação gerado pelo LIDAR também com resolução espacial de 10m



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

6.2 OS RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ALTIMÉTRICA DOS MDE E SUBPRODUTOS NA RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 8M.

Após a primeira sequência de interpolação e análise executadas, se estabeleceu uma segunda rodada de testes com MDE e subprodutos em uma resolução espacial de 8 m. Mais uma vez foram gerados 12 MDE, de acordo com os métodos de interpolação (IDW fixo, IDW variável, Krigagem Ordinária Circular, Krigagem Ordinária Exponencial, Krigagem Ordinária Gaussiana, Krigagem Ordinária Linear, Krigagem Ordinária Esférica, Krigagem Universal Linear, Krigagem Universal Quadrática, Spline Regularizado, Spline Tensionado e Vizinho Natural) além do MDE parâmetro para comparação derivado do LIDAR nesta mesma resolução espacial de 8m .

Entre os valores mínimos de altimetria dos MDE interpolados de dados do ALOS-PALSAR, o menor valor encontrado foi 685,9m, com uma variação de até +0,8m, entre os demais MDE de acordo com o método de interpolação aplicado. Já entre os valores máximos, o encontrado foi a cota de 998,1m, podendo variar, em até -1,3m entre os MDE interpolados de acordo com o interpolador usado (Quadro 3). Um resultado geral com valores muito semelhantes aos modelos de 8m de resolução espacial, gerado a partir do LIDAR, que registraram, como cotas mínimas e máximas, respectivamente, 686m e 996m.

Com relação aos coeficientes de correlação linear e de determinação, observa-se valores um pouco menores em comparação aos encontrados nos MDE de 10m, mas ainda muito altos, demonstrando uma correlação muito forte entre os dados (Quadro 3). Os valores de EMA e REMQ baixos na casa de 4,5m e 5,9m corroboram para esses valores significativos de correlação dos dados (Quadro 3).

Contudo, por mais significativas que sejam as semelhanças apontadas nos testes de correlação, determinação, erro médio e erro médio quadrático, as quais, em um momento inicial, dão a corroborar a ideia de semelhança entre ambos os modelos, independente da resolução espacial e método de interpolação aplicado, isso não é uma realidade propriamente dita. Uma vez que o desempenho individual dos interpolares se modifica de acordo com o aumento da resolução espacial do MDE, no qual começam na realidade a expressar em seu comportamento as suas potencialidades e desafios como ferramentas e inferência espacial, tanto nos MDE como também nos subprodutos.

Entre os MDE, mais uma vez a Krigagem Gaussiana obtém o pior resultado entre os MDE quando comparados com o LIDAR, congregando os maiores índices de erro e a menor

taxa de correlação entre os dados. Tal singularidade do comportamento do interpolador já foi expressa anteriormente de maneira que pode ser explicada pela tendência geral de tal método em suavizar as superfícies, de modo que em valores absolutos, tenderia a acumular maiores valores de dispersão dos dados, fazendo com que obtivesse piores resultados.

Em compensação, os melhores resultados na resolução espacial de 8m deixam de ser obtidos pelo método do Vizinho Natural, passando a apontar uma melhor conformidade dos dados gerados pela Krigagem Universal Quadrática (Quadro 3). Tal comportamento pode ser explicado, pelo fato de que a partir da interpolação dos dados do ALOS-PALSAR originalmente com 12,5m para 8m de resolução espacial, as áreas de inferência passam a ser maiores assim como a incerteza das informações modeladas.

Assim, passam a romper a capacidade de promover um bom ajuste dos dados pelo método do interpolador local do vizinho natural, fazendo com as Krigagens que se valem de um cálculo cuidadoso de médias e distância passem a obter resultados mais consistentes ao ser comparado com o LIDAR. Neste sentido como a Krigagem Universal Quadrática tem a especificidade de durante o ajuste da superfície considerar os valores dos resíduos dos dados como um balizador para ajustar e modelar a superfície, por meio de polinômios simples (SANTOS, 2010), foi capaz de obter melhores resultados, dentro da área de estudo para a resolução espacial de 8m.

Quadro 3 - Índices estatísticos resultantes da comparação dos MDE gerados por cada método de interpolação nos dados do ALOS-PALSAR em relação ao LIDAR, ambos na resolução espacial de 8 m

MDE 08 metros							
Método	Min	Max	Coefficiente de Determinação	Coefficiente da Correlação de Pearson	Erro Médio Absoluto	Erro médio quadrático	Raiz do Erro Quadrático Médio
<i>IDW fixo</i>	686,1m	997,9m	0,992377	0,996217	4,45m	35,68m ²	±5,97m
<i>IDW variável</i>	686,0m	997,9m	0,992415	0,996240	4,44m	35,51m ²	±5,96m
<i>Krigagem Ordinária Circular</i>	686,0m	998,0m	0,992436	0,996254	4,44m	35,40m ²	±5,95m
<i>Krigagem Ordinária Exponencial</i>	686,0m	998,0m	0,992436	0,996254	4,44m	35,40m ²	±5,95m
<i>Krigagem Ordinária Gaussiana</i>	686,7m	996,8m	0,992343	0,996199	4,46m	35,84m ²	±5,99m
<i>Krigagem Ordinária Linear</i>	686,0m	998,0m	0,992436	0,996254	4,44m	35,40m ²	±5,95m
<i>Krigagem Ordinária Esférica</i>	686,0m	998,0m	0,992436	0,996254	4,44m	35,40m ²	±5,95m
<i>Krigagem Universal linear</i>	686,6m	997,6m	0,992388	0,996221	4,45m	35,63m ²	±5,97m
<i>Krigagem Universal Quadrática</i>	686,0m	998,1m	0,992443	0,996258	4,43m	35,37m ²	±5,95m
<i>Spline Regularizado</i>	685,9m	998,1m	0,992431	0,996253	4,44m	35,43m ²	±5,95m
<i>Spline Tensionado</i>	685,9m	998,1m	0,992433	0,996254	4,44m	35,42m ²	±5,95m
<i>Vizinho Natural</i>	686,0m	998,0m	0,992434	0,996252	4,44m	35,42m ²	±5,95m
Max	686,7m	998,1m	0,992443	0,996258	4,46m	35,84m²	±5,99m
Min	685,9m	996,8m	0,992343	0,996199	4,43m	35,37m²	±5,95m

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

6.2.1 Os subprodutos dos MDE de 8m: Avaliação qualitativa da hipsometria e Declividade

O comportamento dos subprodutos gerados a partir dos MDE do ALOS-PALSAR na resolução espacial de 8m, relacionados às temáticas de declividade (Figura 18) e hipsometria (figura 19), obtiveram comportamento semelhante aos elaborados por meio do MDE de 10m de resolução, de fato não apresentando ganhos reais em qualidade o processo de modificação da resolução espacial de 12,5m para 8m.

A declividade gerada pelo MDE de ALOS-PALSAR (Figura 18) com resolução espacial de 8m obteve como maior valor máximo 54,1° obtido pelo método de Spline e o menor valor máximo de 46,6° da Krigagem Universal Linear, demonstrando uma variação de 7,5° entre os próprios produtos do ALOS-PALSAR (Quadro 4).

Entretanto, quando são comparados os valores de declividade gerada pelo LIDAR, que possui um valor máximo de 65,6°, em relação as informações de declividade derivadas dos MDE ALOS-PALSAR, a diferença da variação que flutua entre 19° e 11,5°. É possível assim, considerar que ocorre um aumento nas assimetrias entre os valores máximos de declividade encontrados nos MDE interpolados para a resolução espacial de 8m, quando comparados com as mesmas informações derivadas dos MDE interpolados para a resolução espacial de 10m.

Esse aumento gradual entre a diferença das informações de declividade geradas do ALOS-PALSAR e LIDAR, é consequência de promover um aumento da resolução espacial de 12,5m para 8m nos MDE, obrigando os interpoladores a inferir um maior número de valores desconhecidos no MDE, devido a modificação da resolução espacial.

O comportamento assinalado corrobora desta forma, para o decaimento do SSIM de acordo com as tentativas de aumento da resolução espacial do MDE. Contudo, assim como nos produtos com resolução espacial de 10m, a utilização de intervalos de classe é capaz através de generalizações, suavizar essas falhas.

Os menores valores das classes de declividade possuem a mesma queda no desempenho em delimitar as áreas de relevos planos (até 3% de declividade ou cerca de 1,7°) e relevos suavemente ondulados (até 8% de declividade ou cerca de 4,6°). Haja vista que nos MDE gerados por meio do LIDAR, possuem uma competência maior para registrar as diferenças entre os micros relevos de forma mais homogênea, resultando em uma delimitação mais consistente. Enquanto todos os produtos do ALOS-PALSAR passam a desenhar o limite das duas classes de forma fragmentada, onde uma classe se confunde com a outra (Figura 18), ou

seja, de forma geral passa a apresentar as mesmas características das informações de declividade apresentadas, nos produtos de resolução espacial de 10m.

Já na classe de relevos fortemente ondulados, continua a ocorrer uma boa delimitação entre todos os produtos de declividade. Isto pois os limites que demarcam o limite inferior e superior da classe são consistentes entre todos os MDE interpolados, além de em termos gerais também estarem representadas de forma semelhante na declividade obtida pelo LIDAR (figura 18). Por fim, as últimas duas classes superiores de declividade, respectivamente relevos montanhosos (até 75% de declividade ou cerca de 37°) e escarpados (ou maiores que 75% de declividade, ou seja, superior a 37°) que foram geradas a partir dos MDE ALOS-PALSAR, obtiveram um comportamento semelhante quanto à distribuição e localização, mas não quanto a extensão das áreas (Figura 18).

Dado que os valores superiores de declividade são subestimados nos subprodutos do ALOS-PALSAR na resolução espacial 10m, possuem o mesmo comportamento na resolução espacial de 8 m frente os dados de declividade gerados pelo LIDAR. Onde são demonstradas áreas mais extensas de relevos considerados montanhosos, os quais avançam sobre a classe de relevos fortemente ondulados que acaba delineando um cenário um pouco diferente da realidade demonstrada pelas informações de declividade geradas com os MDE do LIDAR. (figura 18).

Quadro 4 - Valores máximos de declividade encontrados em cada MDE de acordo com método de interpolação aplicado nos dados do ALOS-PALSAR, e o índice de similaridade das imagens (SSIM) gerado pela declividade e hipsometria frente as geradas pelo LIDAR, Ambos em resolução espacial de 8 m.

DECLIVIDADE MDE 8m			
Método	min	Max	SSIM - Structural similarity
<i>IDW fixo</i>	0°	50,07°	0,9282
<i>IDW variável</i>	0°	52,18°	0,9270
<i>Krigagem Ordinária Circular</i>	0°	53,08°	0,9253
<i>Krigagem Ordinária Exponencial</i>	0°	53,08°	0,9253
<i>Krigagem Ordinária Gaussiana</i>	0°	49,05°	0,9285
<i>Krigagem Ordinária Linear</i>	0°	53,08°	0,9253
<i>Krigagem Ordinária Esférica</i>	0°	53,08°	0,9253
<i>Krigagem Universal linear</i>	0°	46,61°	0,9293
<i>Krigagem Universal Quadrática</i>	0°	52,54°	0,9261
<i>Spline Regularizado</i>	0°	54,18°	0,9238
<i>Spline Tensionado</i>	0°	54,03°	0,9241
<i>Vizinho Natural</i>	0°	52,38°	0,9262
Max	0°	54,18°	0,9293
Min	0°	46,61°	0,9238

HIPSOMETRIA MDE 8m	
Método	SSIM - Structural similarity
<i>IDW fixo</i>	0,99436
<i>IDW variável</i>	0,99439
<i>Krigagem Ordinária Circular</i>	0,99440
<i>Krigagem Ordinária Exponencial</i>	0,99440
<i>Krigagem Ordinária Gaussiana</i>	0,99435
<i>Krigagem Ordinária Linear</i>	0,99440
<i>Krigagem Ordinária Esférica</i>	0,99440
<i>Krigagem Universal linear</i>	0,99438
<i>Krigagem Universal Quadrática</i>	0,99441
<i>Spline Regularizado</i>	0,99439
<i>Spline Tensionado</i>	0,99439
<i>Vizinho Natural</i>	0,99441
Max	0,99441
Min	0,99435

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Todavia, apesar de claras as distinções entre ambas as declividades, o interessante é que o comportamento da localização e distribuição dos grandes polígonos formados por esses intervalos se mantém semelhante em todas as informações de declividade geradas tanto pelo LIDAR quanto pelo ALOS-PALSAR (Figura 18).

E por mais significativas as distinções entre ambas as informações de declividade gerada com dados do ALOS-PALSAR e LIDAR, na resolução espacial de 8m, ainda são observadas fortes semelhanças entres os produtos. Haja vista que o SSIM registrou um valor médio de 0,92 com o melhor e o pior variando apenas 0,06 pontos entre si, um pouco abaixo o 0,93 o resultado da comparação das declividades geradas com MDE de 10 m de resolução espacial.

Dessa forma, enquanto o SSIM da declividade era de aproximadamente 0,92, o que já pode ser considerado muito alto, o SSIM da hipsometria se demonstra mais uma vez com uma semelhança maior, estabelecendo um SSIM de 0,99, independentemente do método de interpolação. Sendo esse o mesmo comportamento observado os MDE com resolução espacial de 10m de resolução espacial.

As principais diferenças entre as hipsometrias dos MDE interpolados (figura 19) do ALOS-PALSAR e o do LIDAR são, novamente, as áreas de transição de uma classe para outra. Assim como nos modelos de resolução espacial de 10m, nos MDE de 8m o LIDAR tem limites entre as classes delimitadas de forma mais recortada e detalhada, e a hipsometria dos produtos do ALOS-PALSAR são mais suaves (Figura 19).

Mesmo assim tais distinções entre as hipsometrias não resultam qualitativamente em diferenças significativas nas análises do relevo nesta nova resolução espacial. Pode-se então concluir, quanto à qualidade dos subprodutos gerados pelos MDE do ALOS-PALSAR, que dissociado do tipo de método de interpolação, na hipsometria ocorre um bom ajuste dos dados em uma resolução espacial de 8m. O motivo para tanto mais uma vez é a generalização promovida pela classificação dos dados em intervalos de classe que continua a suavizar as diferenças entre ambos os modelos.

Porém, é necessário salientar, novamente: se o interesse nestes produtos for além da sua utilização por meio de cartas temáticas, normalizadas por intervalos de classe, com o intuito de promover observações de valores discretos absolutos, é necessário tomar cuidados, pois, de acordo com o interpolador, a diferença nas declividades mais altas pode chegar a quase 20° (34% de declividade em termos percentuais) como observadas no quadro 5. Valores esses, superiores as já preocupantes diferenças observadas nos MDE de resolução espacial de 10m.

Os maiores valores das derivadas dos MDE no ALOS-PALSAR, e conseqüentemente mais próxima aos valores máximos das declividades derivadas do MDE do LIDAR já que os

MDE-ALOS tendem a subestimar os valores de declividade máxima, foram aquelas geradas pelos MDE interpolados pelo método Spline Regularizado.

Tal comportamento não é de fato uma surpresa, uma vez que pelo fato de os Splines serem algoritmos que forçam a superfície modelada a obrigatoriamente tocar em todos os pontos amostrais. Uma vez que, enquanto o Spline tensionado não permite que os espaços sem informações entre os pontos amostrais (áreas a serem inferidos valores, por serem desconhecidas) tenham valores de altimetria superiores ou inferiores aos próprios pontos amostrais, por outro lado Spline regularizado permite de acordo com a tendência geral dos pontos, que a superfície se eleve e/ou se comprima, sem que entre dois pontos amostrais a superfície não possa ultrapassar os seus valores. Isso resulta em uma superfície que tem valores de acordo com a tendência dos dados, mais acentuados que os pontos amostrais e consequentemente maiores valores máximos de declividade.

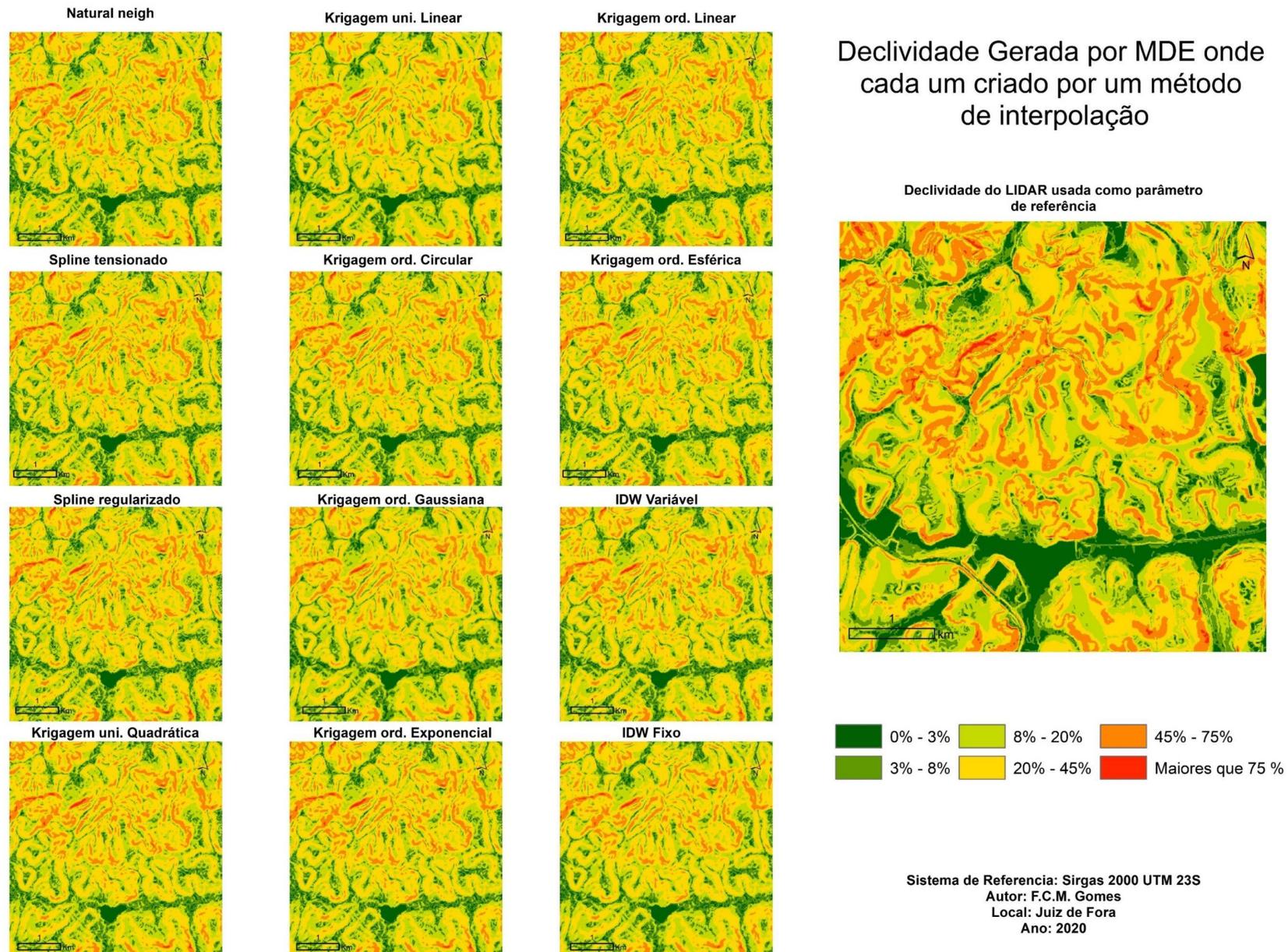
Quadro 5 - Comparativo entre a diferença entre os valores máximos de declividade e termos absolutos em graus e relativos de porcentagens MDE com resolução de 8m

DECLIVIDADE MDE 8m				
Método	Valor Máx ALOS-PALSAR	Valor Max LIDAR	Diferença em graus	Diferença em percentual
<i>IDW fixo</i>	50,07°	65,6°	15,53°	27,8%
<i>IDW variável</i>	52,18°	65,6°	13,42°	23,9%
<i>Krigagem Ordinária Circular</i>	53,08°	65,6°	12,52°	22,2%
<i>Krigagem Ordinária Exponencial</i>	53,08°	65,6°	12,52°	22,2%
<i>Krigagem Ordinária Gaussiana</i>	49,05°	65,6°	16,55°	29,7%
<i>Krigagem Ordinária Linear</i>	53,08°	65,6°	12,52°	22,2%
<i>Krigagem Ordinária Esférica</i>	53,08°	65,6°	12,52°	22,2%
<i>Krigagem Universal linear</i>	46,61°	65,6°	18,99°	34,4%
<i>Krigagem Universal Quadrática</i>	52,54°	65,6°	13,06°	23,2%
<i>Spline Regularizado</i>	54,18°	65,6°	11,42°	20,2%
<i>Spline Tensionado</i>	54,03°	65,6°	11,57°	20,5%
<i>Vizinho Natural</i>	52,38°	65,6°	13,22°	23,5%
Max	54,18°	65,6°	18,99°	34,4%
Min	46,61°	65,6°	11,42°	20,2%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

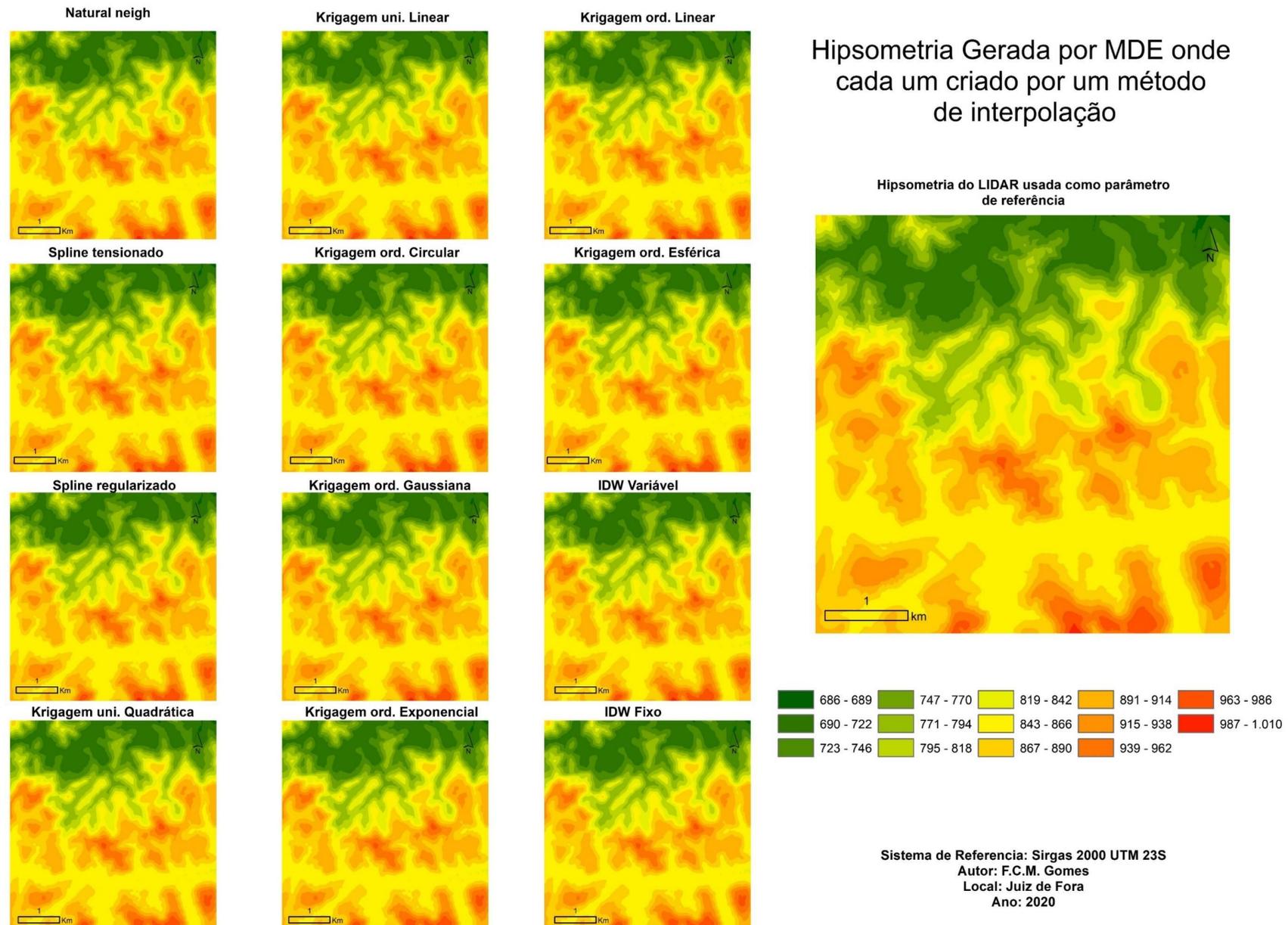
É possível então, constatar no que tange aos subprodutos dos MDE do ALOS-PALSAR na resolução espacial de 8m, que as diferenças encontradas (mas especificamente na declividade) obtiveram aumento, quando comparadas com os subprodutos de 10m de resolução espacial. Uma vez que, registra-se a ocorrência de um decréscimo significativo da qualidade das informações de declividade em valores absolutos, quando o MDE é submetido a uma melhora forçada de sua resolução espacial por meio da aplicação de técnicas de interpolação.

Figura 18 - Declividade gerada por meio dos MDE gerados de acordo com cada método de interpolação a partir dos dados do ALOS-PALSAR com resolução espacial de 08 m e do MDE base para a comparação gerado pelo LIDAR também com resolução espacial de 08 m



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 19 - Hipsometria gerada por meio dos MDE gerados de acordo com cada método de interpolação a partir dos dados do ALOS-PALSAR com resolução espacial de 08m e do MDE base para a comparação gerado pelo LIDAR também com resolução espacial de 08 m



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

6.3 OS RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ALTIMÉTRICA DOS MDE E SUBPRODUTOS NA RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 6M.

Por fim, após as primeiras rodadas de interpolação e análise, se executou a última sequência de testes com MDE e subprodutos em uma resolução espacial de 6m. Mais uma vez foram gerados 12 MDE, de acordo com os métodos de interpolação (IDW fixo, IDW variável, Krigagem Ordinária Circular Krigagem Ordinária Exponencial, Krigagem Ordinária Gaussiana, Krigagem Ordinária Linear, Krigagem Ordinária Esférica, Krigagem Universal Linear, Krigagem Universal Quadrática, Spline Regularizado, Spline Tensionado e Vizinho Natural) além do MDE parâmetro para comparação derivado do LIDAR nesta mesma resolução espacial de 6m.

Nesta última etapa, observou-se que entre os valores mínimos de altimetria entre os MDE interpolados dos dados do ALOS-PALSAR, o menor valor encontrado foi 685,8m, variando para mais, entre os outros MDE interpolados, no máximo 0,8m entre si, valores muito semelhantes aos encontrados nos MDE interpolados para a resolução espacial 8m. Já entre os valores maiores o máximo foi a cota de 998,1m, podendo variar, para menos, em até 10,08m entre os interpoladores (Quadro 6), o que de fato já demonstra uma diferença considerável entre as demais resoluções espaciais analisadas que variaram apenas cerca de 10% deste valor.

Quadro 6 - Índices estatísticos resultantes da comparação dos MDE gerados por cada método de interpolação nos dados do ALOS-PALSAR em relação ao LIDAR, ambos na resolução espacial de 6m

MDE 6 metros							
Método	Min	Max	Coefficiente de Determinação	Coefficiente da Correlação de Pearson	Erro Médio Absoluto	Erro médio quadrático	Raiz do Erro Quadrático Médio
<i>IDW fixo</i>	686,15m	997,99m	0,99317	0,99662	4,18m	32,05m ²	±5,66
<i>IDW variável</i>	686,13m	997,99m	0,99318	0,99662	4,18m	31,99m ²	±5,66
<i>Krigagem Ordinária Circular</i>	686,00m	998,05m	0,99321	0,99664	4,17m	31,87m ²	±5,65
<i>Krigagem Ordinária Exponencial</i>	686,00m	998,05m	0,99321	0,99664	4,17m	31,87m ²	±5,65
<i>Krigagem Ordinária Gaussiana</i>	686,67m	996,83m	0,99310	0,99658	4,20m	32,37m ²	±5,69
<i>Krigagem Ordinária Linear</i>	686,00m	988,05m	0,99321	0,99664	4,17m	31,87m ²	±5,65
<i>Krigagem Ordinária Esférica</i>	686,00m	998,05m	0,99321	0,99664	4,17m	31,87m ²	±5,65
<i>Krigagem Universal linear</i>	686,63m	997,51m	0,99314	0,99660	4,19m	32,16m ²	±5,67
<i>Krigagem Universal Quadrática</i>	686,00m	998,12m	0,99321	0,99664	4,17m	31,83m ²	±5,64
<i>Spline Regularizado</i>	685,82m	998,14m	0,99320	0,99664	4,17m	31,89m ²	±5,65
<i>Spline Tensionado</i>	685,86m	998,10m	0,99320	0,99664	4,17m	31,87m ²	±5,65
<i>Vizinho Natural</i>	686,04m	998,00m	0,99320	0,99664	4,17m	31,89m ²	±5,65
Max	686,67m	998,14m	0,99321	0,99664	4,20m	32,37m²	±5,69
Min	685,82m	988,05m	0,99310	0,99658	4,17m	31,83m²	±5,64

Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo tal comportamento pode ser facilmente explicado pela própria característica do interpolador que gerou tal resultado, já que o Spline Regularizado com já destacado anteriormente, força a superfície a tocar os pontos amostrais e entre os pontos (espaços que terão os valores inferidos) de acordo com a tendência dos pontos, permite que o modelo se projete acima ou abaixo destes pontos amostrais. Possibilitando desta forma, que de acordo com a tendência de os pontos amostrais elevar ou suprimir a superfície além dos valores amostrais.

Considerando tal comportamento, se torna justificável que tal método tenha obtido as maiores variações altimétricas, uma vez que o processo de interpolação neste momento promove uma melhora na resolução espacial de 148%, forçando os interpoladores a de fato inferirem valores desconhecidos em áreas cada vez maiores.

Com relação aos coeficientes de correlação e de determinação, observa-se valores um pouco maiores em comparação aos encontrados nos MDE de 10m e 8m, mas ainda muito altos e semelhantes aos já observados nas resoluções espaciais analisadas anteriormente, demonstrando uma correlação muito forte entre os dados (Quadro 6) que são corroborados mais uma vez com os baixos valores de EMA e REMQ, na casa de 4,2 m e 5,68 m que contribuem para esses valores significativos de correlação dos dados (Quadro 6).

Contudo, por mais expressivas que sejam as semelhanças apontadas nos testes de correlação, determinação, são esses pequenos valores de dispersão, demonstrados pelo erro médio e erro médio quadrático, que vão ser capazes de promover um entendimento mais consistente do comportamento dos métodos de interpolação no processo de geração de MDE com um aumento de resolução espacial tão significativo.

Observa-se, assim como na resolução espacial de 8m, a existência de certa superioridade da Krigagem Universal Quadrática como interpolador em todos os testes aplicados, à medida que esse comportamento segue o mesmo padrão nos MDE de resolução espacial de 6m, trazendo como resultados: os maiores valores de correlação, determinação, e conseqüentemente, os menores valores dos testes na teoria de erros. Isso pode ser explicado por uma característica geral da Krigagem, que se vale de médias ponderadas a fim de resultar na sua interpolação a modelagem com uma superfície com a menor variância possível.

Neste sentido, é possível afirmar que a partir da resolução espacial de 8 m quando as áreas de inferência espacial ser tornam cada vez maiores e finalmente na resolução espacial de 6 m, os melhores resultados são daqueles interpoladores que deixam de ser valer apenas dos valores locais para modelar a superfície, e passam a se normalizar a partir de médias globais de toda a população dos dados amostrais.

Diante de tal realidade, seria inicialmente natural considerar que todas as Krigagens se sairiam superiores aos demais interpoladores, todavia tal pensamento não é corroborado pelos resultados obtidos nos testes aplicados. Isso porque enquanto a Krigagem Universal Quadrática ganha destaque com os melhores índices estatísticos, a Krigagem Ordinária Gaussiana passa a ostentar os piores índices entre todos os métodos analisados na resolução espacial de 6m.

O peculiar comportamento da Krigagem Gaussiana, de baixo desempenho, foi de fato já discutido anteriormente para os MDE de resolução espacial de 10m e 8m, e se repete no processo de interpolação para a resolução espacial de 6m.

Por sua vez, como de maneira geral as Krigagem universais passa a ter seu ajuste feito por meio de polinômios simples, que focalizam em analisar os resíduos de ajuste dos dados (SANTOS, 2010) para a modelagem da superfície, a Krigagem universal quadrática foi capaz de gerar uma superfície mais consistente com valores de correlação maiores e resultados da teoria de erros com menores assimetrias entre os MDE re-interpolados do ALOS-PALSAR e o MDE parâmetro de comparação gerado pelo LIDAR.

6.3.1 Os subprodutos dos MDE de 6m: Avaliação qualitativa da hipsometria e Declividade

O comportamento dos subprodutos gerados a partir dos MDE do ALOS-PALSAR na resolução espacial de 6m, relacionados às temáticas declividade (Figura 20) e de hipsometria (figura 21) obtiveram comportamento semelhante aos elaborados por meio do MDE de 10m e 8m, comprovando que de fato não ocorrem ganhos reais em qualidade ao longo do processo de interpolação a fim de promover refinamento da resolução espacial do MDE fonte das informações.

A declividade gerada pelo MDE de ALOS-PALSAR (Figura 20) em resolução espacial de 6m obteve como maior valor máximo $54,98^\circ$ obtido pelo método de Spline regularizado e o menor valor máximo de $46,61^\circ$ da Krigagem Universal Linear, demonstrando uma variação de até $8,39^\circ$ entre os próprios produtos do ALOS-PALSAR (Quadro 7).

Entretanto, quando esses produtos são comparados com as informações de declividade gerada pelo LIDAR, a qual possui um valor máximo de $68,14^\circ$, é possível observar que para as declividades do ALOS-PALSAR, ocorre uma variação de aproximadamente $21,55^\circ$ entre menor valor máximo encontrado, e de $13,16^\circ$ para o maior valor máximo de declividade frente ao LIDAR.

É possível observar que ocorre um aumento na diferença entre os valores máximos de declividade encontrados nos MDE interpolados para a resolução espacial de 6m, se comparados

com os MDE com resolução espacial de 10m e 8m, confirmando que quanto maior for a tentativa de aumento da resolução espacial, e conseqüentemente maiores as inferências de valores desconhecidos no MDE gerado, mais assimétricas serão os valores máximos e mínimos das declividades frente ao MDE parâmetro de comparação gerado por meio do LIDAR, originalmente com 1m de resolução.

Quadro 7 - Valores máximos de declividade encontrados em cada MDE de acordo com método de interpolação aplicado nos dados do ALOS-PALSAR, e o índice de similaridade das imagens (SSIM) gerado pela declividade e hipsometria frente as geradas pelo LIDAR, Ambos em resolução espacial de 6 m.

DECLIVIDADE MDE 6 m			
Método	Mín	Max	SSIM - Structural similarity
<i>IDW fixo</i>	0°	53,08°	0,92509
<i>IDW variável</i>	0°	53,67°	0,92454
<i>Krigagem Ordinária Circular</i>	0°	54,02°	0,92255
<i>Krigagem Ordinária Exponencial</i>	0°	54,02°	0,92254
<i>Krigagem Ordinária Gaussiana</i>	0°	47,09°	0,92689
<i>Krigagem Ordinária Linear</i>	0°	54,02°	0,92255
<i>Krigagem Ordinária Esférica</i>	0°	54,02°	0,92255
<i>Krigagem Universal linear</i>	0°	46,59°	0,92755
<i>Krigagem Universal Quadrática</i>	0°	53,87°	0,92386
<i>Spline Regularizado</i>	0°	54,98°	0,91982
<i>Spline Tensionado</i>	0°	54,86°	0,92100
<i>Vizinho Natural</i>	0°	53,89°	0,92363
Max	0°	54,98°	0,92755
Min	0°	46,59°	0,91982

HIPSOMETRIA MDE 6 m	
Método	SSIM - Structural similarity
<i>IDW fixo</i>	0,99434
<i>IDW variável</i>	0,99434
<i>Krigagem Ordinária Circular</i>	0,99430
<i>Krigagem Ordinária Exponencial</i>	0,99430
<i>Krigagem Ordinária Gaussiana</i>	0,99433
<i>Krigagem Ordinária Linear</i>	0,99430
<i>Krigagem Ordinária Esférica</i>	0,99430
<i>Krigagem Universal linear</i>	0,99435
<i>Krigagem Universal Quadrática</i>	0,99432
<i>Spline Regularizado</i>	0,99429
<i>Spline Tensionado</i>	0,99429
<i>Vizinho Natural</i>	0,99433
Max	0,99435
Min	0,99429

Fonte: Elaborado pelo autor.

Mas como nos produtos de resolução espacial de 10m e 8m, a utilização de intervalos de classe é capaz de promover generalizações que suavizam essas falhas. Os menores valores das classes de declividade possuem idêntica queda no desempenho em delimitar as áreas de relevos planos (até 3% de declividade ou cerca de 1,7°) e de relevos suavemente ondulados (até 8% de declividade ou cerca de 4,6°) (figura 20).

Assim tal comportamento recorrente na resolução espacial de 10m, 8m e 6m contribui mais uma vez para a compreensão de que não existem ganhos ou perdas reais de qualidade para as informações de declividade, se apresentadas nestes intervalos de classe como mapas temáticos. Já na classe de relevos fortemente ondulados, é mantido o comportamento de uma boa delimitação entre todos os produtos de declividade com resolução espacial de 6m do ALOS-PALSAR, em comparação com os produtos derivados do LIDAR. Isto pois os limites que demarcam a fronteira inferior e superior da classe são consistentes entre todos os interpoladores,

além de em termos gerais também estarem representadas de forma semelhante na declividade obtida pelo LIDAR (Figura 20).

Por fim, ao observarem as últimas duas classes superiores de declividade, respectivamente relevos montanhosos (até 75% de declividade ou cerca de 37°) e escarpados (ou maiores que 75% de declividade ou seja superior a 37°) que foram geradas a partir do ALOS-PALSAR ocorre um comportamento semelhante quanto à distribuição e localização (figura 14). Dado que os valores superiores de declividade são subestimados nos subprodutos do ALOS-PALSAR tanto com resolução espacial de 10m quanto 8m como já destacado anteriormente, esse comportamento se mantém presente nos produtos de 6m (Figura 20).

Contudo, por mais que ocorra uma suavização das assimetrias entre as declividades geradas de acordo com cada um dos métodos de interpolação, frente a comparação com aquela gerada por meio de um MDE levantado com LIDAR, os resultados do SSIM demonstram que se reduz gradativamente as semelhanças qualitativas entre as informações de declividades à medida que ocorre o aumento da resolução espacial do MDE por meio de interpolação sucessivas.

Nas interpolações para a resolução espacial de 10m, o SSIM máximo entre as declividades chega à casa dos 0,9325 sofrendo uma redução entre os produtos com resolução espacial de 8 m, obtendo então os valores máximos atingindo 0,9293 o que ao comparar produtos com resolução espacial de 6m passam a apresentar um SSIM máximo de 0,9275 (Quadro 7). E nos menores valores encontrados pelo SSIM, o comportamento das assimetrias são mais expressivos entre os métodos de interpolação, uma vez que na resolução espacial de 6m é pela primeira vez onde o SSIM fica na casa abaixo dos 0,92, resultado da supressão das áreas de maior declividade, que resultam em uma representação um pouco disforme da realidade descrita na área de estudo pelo LIDAR.

No que se refere a hipsometria os resultados são mais consistentes a manutenção de uma maior semelhança entre os modelos, porque assim como nas resoluções espaciais de 10m e 8m tal carta temática demonstrou um grande potencial para se assemelhar com os produtos derivados do LIDAR (Figura 21).

Mesmo que existam ainda pequenas diferenças entre as hipsometrias do ALOS-PALSAR e LIDAR, estas de forma geral não resultam qualitativamente em diferenças significativas nas análises do relevo nesta resolução espacial de 6m. Pode-se então afirmar, quanto à qualidade dos subprodutos gerados pelos MDE do ALOS-PALSAR, independentemente do método de interpolação, ocorre um bom ajuste dos dados em uma resolução espacial de 10m, 8m e 6m para a hipsometria.

O motivo para tanto é que a generalização promovida pela classificação dos dados em intervalos de classe que continua a suavizar bem as diferenças entre ambos os modelos.

Tal consideração sobre os intervalos de classe na geração de mapas qualitativos, podem ser ampliadas para explicar também a boa conformidade das cartas de declividade também, uma vez que os intervalos de classe se constituem uma boa forma de, por meio de generalizações, promover uma suavização dos ruídos destes produtos, que tendem a aumentar de acordo com o processo de modificação da resolução espacial dos MDE.

Porém, é necessário destacar enfaticamente mais uma vez (correndo o risco de ser prolixo) que não é possível defender a utilização tais produtos para promover análises que utilizarão como dados os valores discretos dos subprodutos gerados de MDE interpolados, principalmente se tratando das cartas de declividade. Isso porque, ao analisar seu comportamento de acordo com o método de interpolação utilizado para a geração dos MDE na resolução espacial de 6m, a diferença nos valores máximos de declividades pode ultrapassar 21^o representando percentualmente um valor acima de 38% de variação.

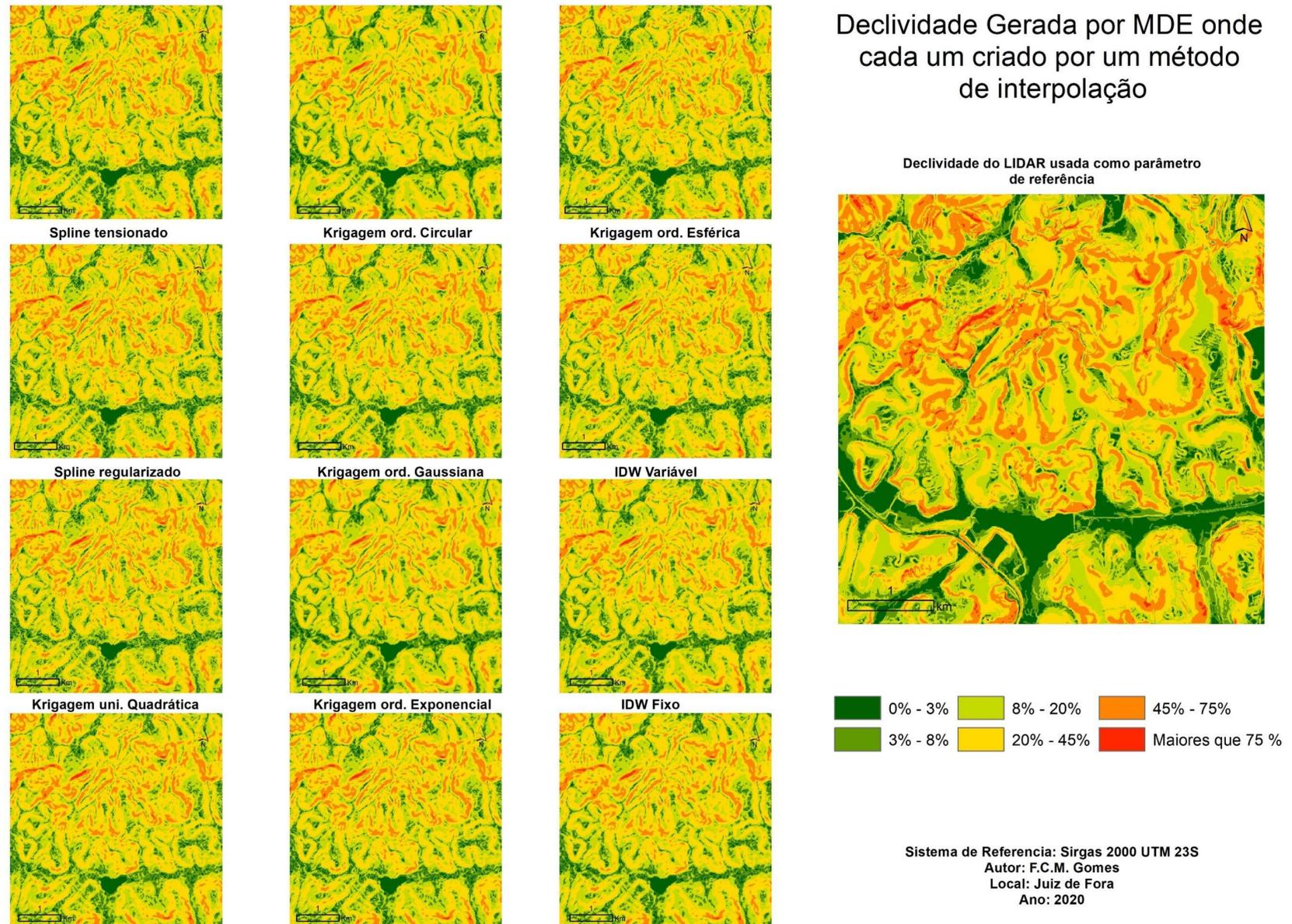
Essas assimetrias entre os valores de declividade, obtiveram aumento considerável do ALOS-PALSAR na resolução espacial de 6m, quando comparado com aqueles produtos em resoluções espaciais de 10m e 8m. Registrando assim a ocorrência de um decréscimo significativo na qualidade das informações de declividade em valores absolutos discretos, cada vez que o MDE é submetido a um aumento de sua resolução espacial (Quadro 8).

Quadro 8 - Comparativo entre a diferença entre os valores máximos de declividade e termos absolutos em graus e relativos de porcentagens MDE com resolução de 6m

DECLIVIDADE MDE 6 m				
Método	Valor Máx ALOS-PALSAR	Valor Max LIDAR	Diferença em graus	Diferença em percentual
<i>IDW fixo</i>	53,08°	68,14°	15,06	26,9%
<i>IDW variável</i>	53,67°	68,14°	14,47°	25,8%
<i>Krigagem Ordinária Circular</i>	54,02°	68,14°	14,12°	25,2%
<i>Krigagem Ordinária Exponencial</i>	54,02°	68,14°	14,12°	25,2%
<i>Krigagem Ordinária Gaussiana</i>	47,09°	68,14°	21,05°	38,5%
<i>Krigagem Ordinária Linear</i>	54,02°	68,14°	14,12°	25,2%
<i>Krigagem Ordinária Esférica</i>	54,02°	68,14°	14,12°	25,2%
<i>Krigagem Universal linear</i>	46,59°	68,14°	21,55°	39,5%
<i>Krigagem Universal Quadrática</i>	53,87°	68,14°	14,27°	25,4%
<i>Spline Regularizado</i>	54,98°	68,14°	13,16°	23,4%
<i>Spline Tensionado</i>	54,86°	68,14°	13,28°	23,6%
<i>Vizinho Natural</i>	53,89°	68,14°	14,25°	25,4%
Max	54,98°	68,14°	21,55°	39,5%
Min	46,59°	68,14°	13,16°	23,4%

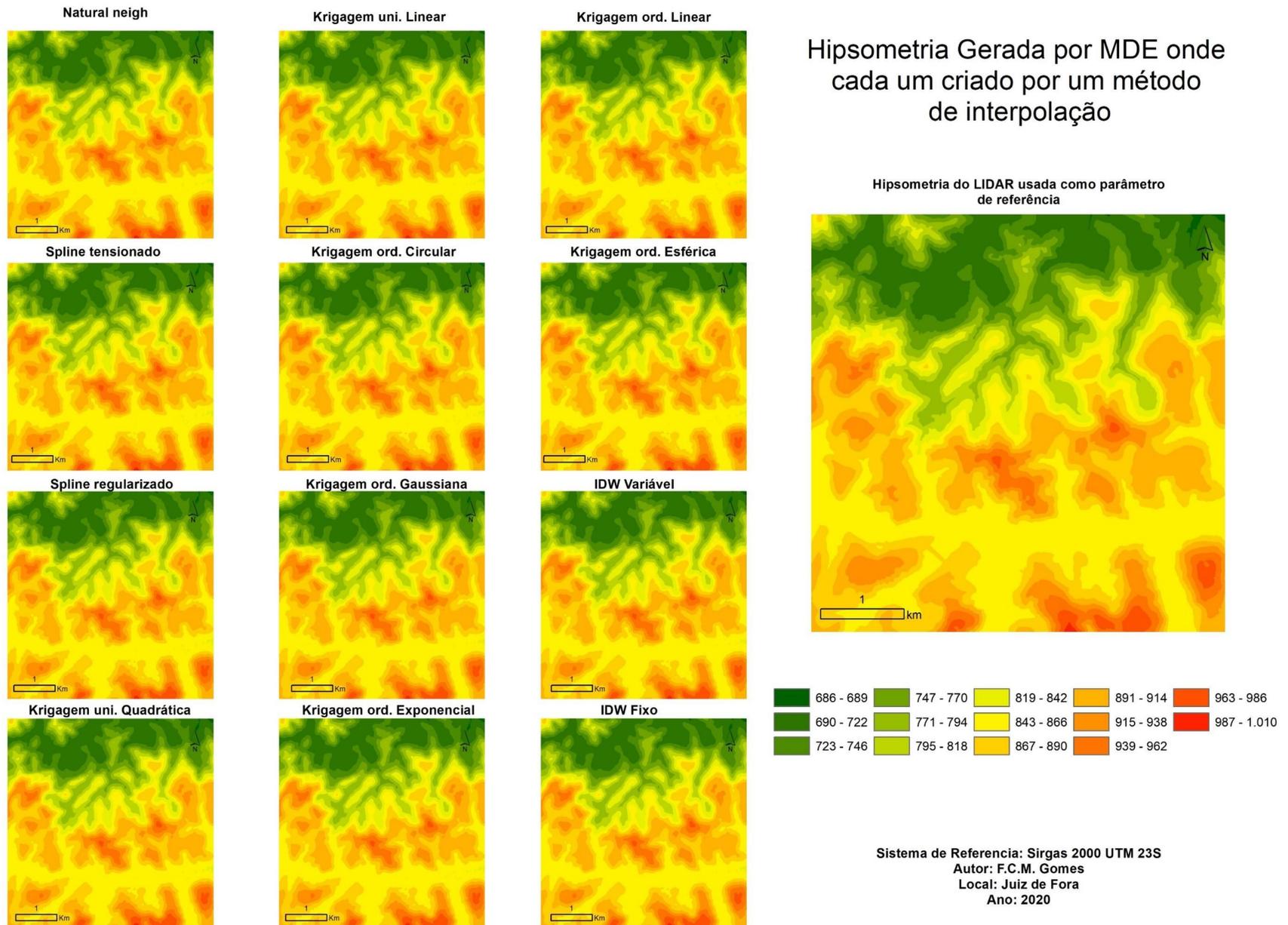
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - MDE gerados de acordo com cada método de interpolação a partir dos dados do ALOS-PALSAR com resolução espacial de 08 m e o MDE base para a comparação gerado pelo LIDAR também com resolução espacial de 08 m



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 21 - Hipsometria gerada por meio dos MDE gerados de acordo com cada método de interpolação a partir dos dados do ALOS-PALSAR com resolução espacial de 08 m e do MDE base para a comparação gerado pelo LIDAR também na resolução espacial de 06 m



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

6.4 ANÁLISE DOS PERFIS DE RELEVO VIRTUAIS: CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FORMAS, TIPOS DE COBERTURAS E SUA INFLUÊNCIA NA REPRESENTAÇÃO DO RELEVO

Foram gerados 12 perfis em ambiente GIS, para cada um dos traçados previamente delimitados, sendo referentes aos MDE gerados de acordo com os métodos de interpolação analisados ao longo da pesquisa e em cada uma das resoluções espaciais trabalhadas, totalizando assim 108 perfis de relevos diferentes (Apêndice A, B, C, D, E, F, G, H e I) sobrepostos sobre um perfil, usado como parâmetro de comparação, gerado a partir de dados levantados com LIDAR, de resolução espacial 1m.

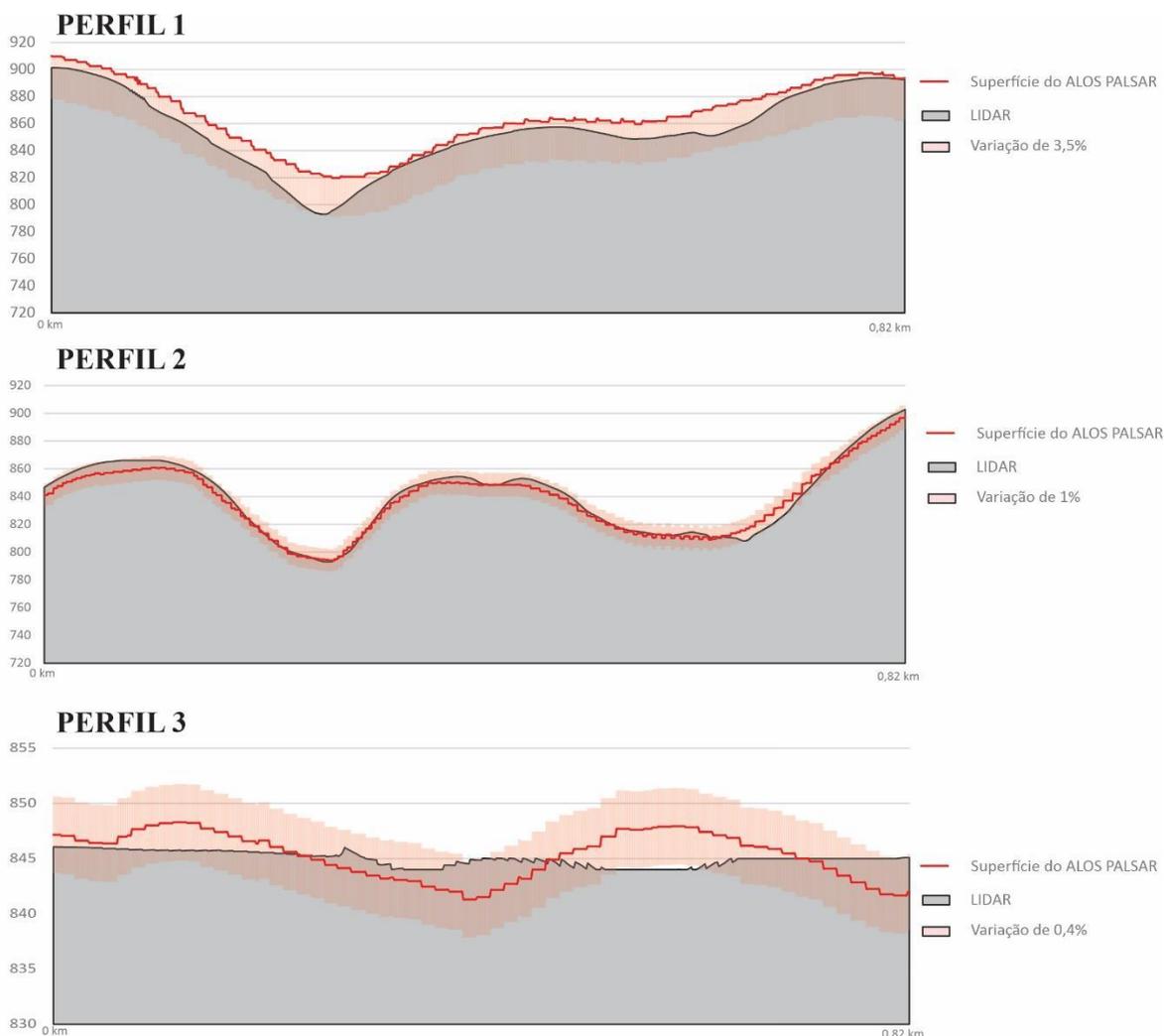
De maneira geral, não houve uma distinção qualitativa considerável entres os métodos de interpolação, independente das resoluções espaciais analisadas, quando os perfis dos MDE do ALOS-PALSAR são comparados entre si, ou ainda, com superfície gerada pelo MDE do LIDAR com 1m de resolução espacial.

Assim, como as assimetrias de todos os métodos de interpolação foram semelhantes, tanto em relação as formas como na posição ao longo dos perfis, é seguro sustentar que os ruídos observados podem não estar relacionados aos métodos de interpolação, mas a própria limitação dos dados originais do ALOS-PALSAR usados para a geração dos novos MDE em escalas de maior detalhe.

Tal conclusão é fundamentada pela forma como são distribuídas as variações observadas, uma vez que no Perfil 1 em geral os valores percentuais da variação dos MDE do ALOS-PALSAR quando comprado ao LIDAR, flutuaram cerca de 3,5% em relação a altimetria, enquanto que os Perfis 2 e 3 por sua vez respectivamente variaram 1% a 0,4% (Figura 22), e todos os erros observados se encontram na mesma posição ao longo dos traçados das vertentes no perfil e/ou do tipo de cobertura.

Diante de tal realidade, os perfis não serão analisados de acordo com a resolução espacial, como feito nas análises dos MDE e seus subprodutos, mas sim de acordo com cada traçado individualmente, estabelecendo relações com a geometria das formas e usos e coberturas.

Figura 22 - Esquema representativo da variação percentual dos MDE do ALOS em relação ao LIDAR em cada um dos traçados dos perfis analisados



Fonte: Elaborado pelo autor.

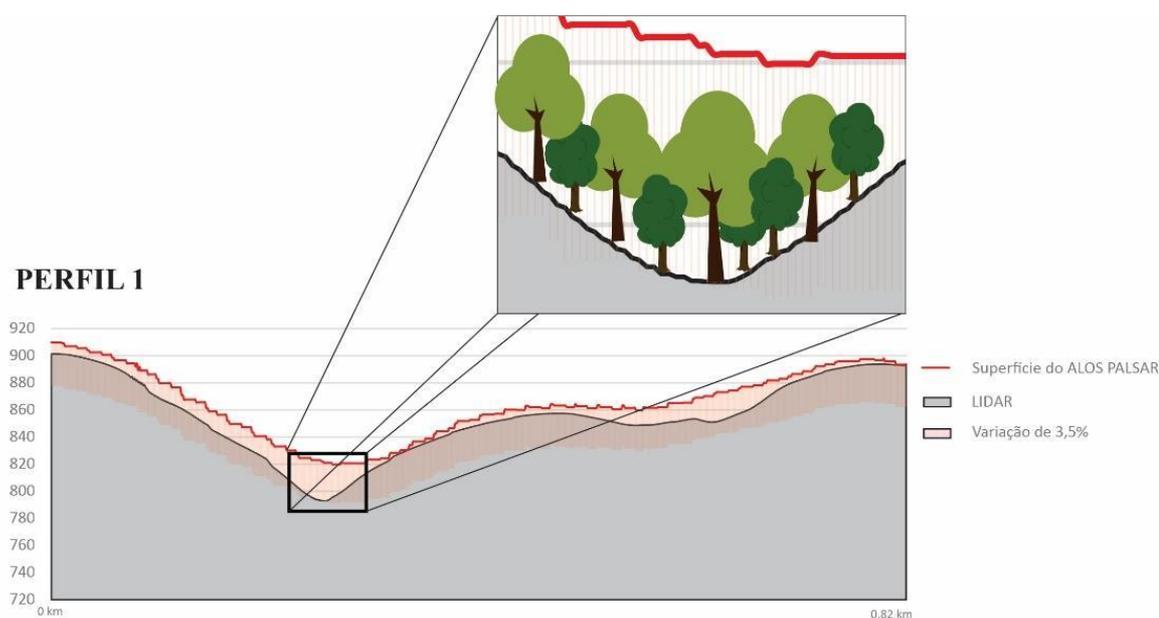
6.4.1 Análise dos Perfis de relevo: Os traçados do PERFIL 1

Na análise do PERFIL 1 (Figura 12) foram gerados 36 perfis de relevo ao todo (Apêndices A, B e C) referente as superfícies interpoladas com dados do ALOS-PALSAR, na área pré-selecionada número 2 (Figura 11). A área é um local marcado por uma composição de formas bem declivosas e com uma cobertura arbórea relativamente densa. Tal área foi destacada, como já expresso anteriormente, devido a necessidade de analisar o comportamento do “efeito dossel” nos MDE interpolados dos dados do ALOS-PALSAR, um problema que foi recorrente na geração dos MDE derivados da missão SRTM, quase 20 anos (VALERIANO, 2008).

Diante de tais características da área, foi possível observar que a vegetação arbórea densa influenciou nos valores das assimetrias assinaladas em todos os perfis gerados (Figura

23). Uma vez que, foi no PERFIL 1 que as diferenças em comparação do LIDAR se mostraram as mais expressivas entre todas as áreas, chegando a cerca de 3,5% do valor da altimetria em alguns casos. Esses valores são três vezes os de qualquer uma das demais áreas analisadas, e vão se localizar preferencialmente em fundos de vales ou locais de superfície mais suave, onde a vegetação é capaz de se instalar e desenvolver-se melhor.

Figura 23 - Esquema ilustrativo da possível influência do “efeito dossel” na geração dos MDE com dados do ALOS-PALSAR



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na realidade ficou claro que a combinação entre vegetação arbórea densa e formas côncavas localizadas no sopé dos fundos de vales não são propícias para serem analisadas por meio dos MDE interpolados dos dados do ALOS-PALSAR. Isso porque além da barreira natural feita pela vegetação arbórea, é possível que somado ao ângulo de imageamento do sensor PALSAR e o seu grau de incidência na superfície, ocorra uma ressonância que dificulte a detecção da onda retro espalhada após a sua interação com a superfície.

Essa baixa competência no registro e representação das formas côncavas, gera nos perfis uma suavização geral na superfície, fator que influencia diretamente em informações e análises que podem ser extraídas dos MDE e/ou perfis interpolados dos dados do ALOS-PALSAR. Um exemplo prático desta influência, é observado nas informações de declividade, que de forma geral são subestimados nos perfis, um comportamento que corrobora com as análises qualitativas dos subprodutos dos MDE de declividade. Entretanto, a análise dos perfis permite

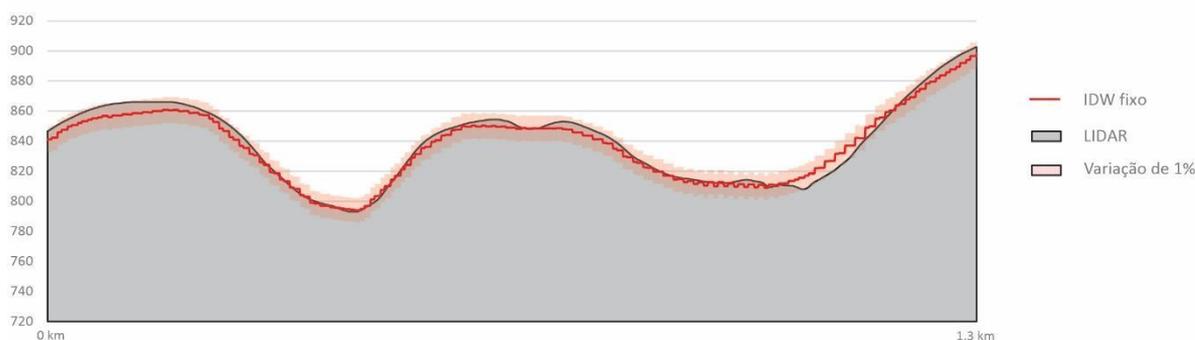
ir além, possibilitando a localização de quais áreas são as mais críticas, e sofrem com uma maior deformação ao logo das vertentes.

6.4.2 Análise dos Perfis de relevo: Os traçados do PERFIL 2

Para a análise do PERFIL 2 (Figura 12) foram gerados 36 perfis de relevo (Apêndices D, E e F) referente as superfícies interpoladas com os dados do ALOS-PALSAR, na área pré-selecionada número 1 (Figura 11). Tal área possui uma composição geral do relevo com formas bem declivosas de amplitudes altimétricas consideráveis, além de contrastar com o traçado do PERFIL 1 por ter uma cobertura vegetal de pastagens, com um dossel incapaz de promover interferências consideráveis nos dados obtidos pelo ALOS-PALSAR na geração dos MDE.

De maneira que essa área de escarça cobertura, gerou perfis de relevo capazes de promover uma melhor conformidade, com a superfície parâmetro de comparação gerada pelo LIDAR, uma vez que passaram a variar no máximo apenas 1% entre ambos os modelados do relevo (Figura 24).

Figura 24 - Traçado referente ao PERFIL 2, demonstrando a superfície derivada dos dados do ALOS-PALSAR e LIDAR além da faixa de variação percentual de ambas



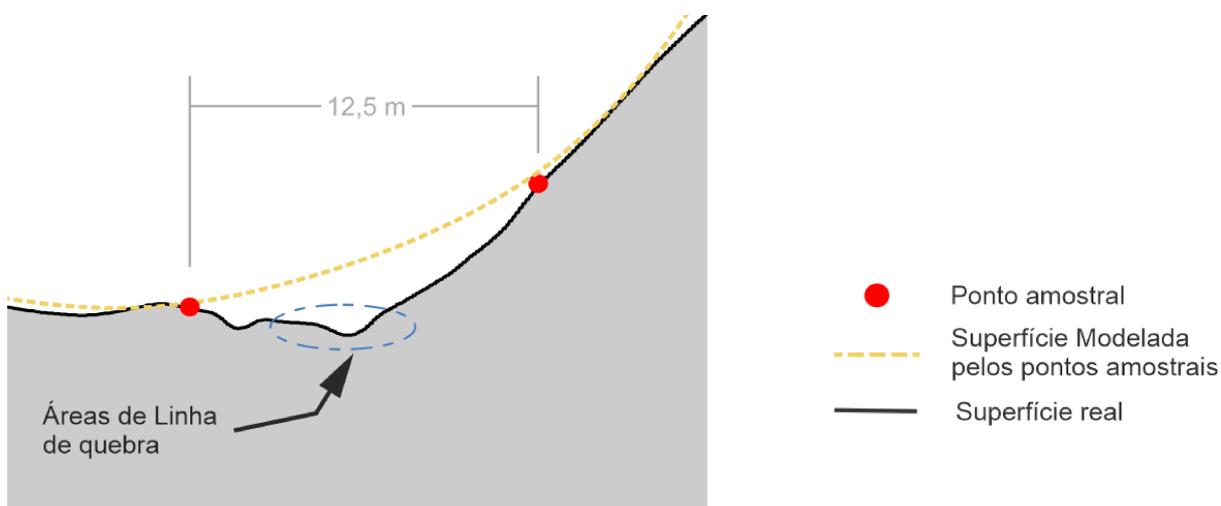
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa distribuição dos dados, permite advogar que as superfícies com coberturas de baixa densidade (solo exposto, pastagens, vegetação arbustiva) podem ser modeladas por meio de MDE derivados do ALOS-PALSAR mesmo se interpolado. Isso porque, por mais que ocorra uma representação um pouco mais grosseira da superfície nos MDE interpolados do ALOS-PALSAR, de forma geral o modelo é capaz de representar a composição das formas, mantendo uma boa conformidade da geometria do relevo, o que não alteraria de forma significativa informações extraídas destes dados.

Os pontos de maior divergência, se encontram nas linhas de quebras dos fundos de vales e topos de morro, que é onde prevalece a ocorrência de valores maiores de ruído. Isso é resultado da própria qualidade geral dos dados de entrada do ALOS-PALSAR, que se derivamos MDE interpolados para resoluções espaciais de maior detalhe. Com um espaçamento de 12,5m dos pontos amostrais originais, é possível que essas linhas de quebra tenham se posicionado entre dois pontos amostrais, não ficando claramente delimitadas no MDE original, usados para gerar os demais MDE em outras resoluções espaciais (Figura 25).

Essa peculiaridade resultaria no processo de inferência espacial dos métodos de interpolação, que essas áreas de discontinuidades fossem suavizadas. Passando a gerar assimetrias na superfície delimitada pelos MDE derivados do ALOS-PALSAR frente ao LIDAR. Porém, mesmo com esses ruídos o desempenho dos MDE derivados do ALOS-PALSAR em representar superfícies bem rugosas com coberturas de baixa densidade, pode ser considerado muito bom (Figura 25).

Figura 25 - Esquema ilustrativo da possível influência do posicionamento dos pontos amostrais entre uma área de linha de quebra, que gera uma suavização da superfície modelada no processo de interpolação



Fonte: Elaborado pelo autor.

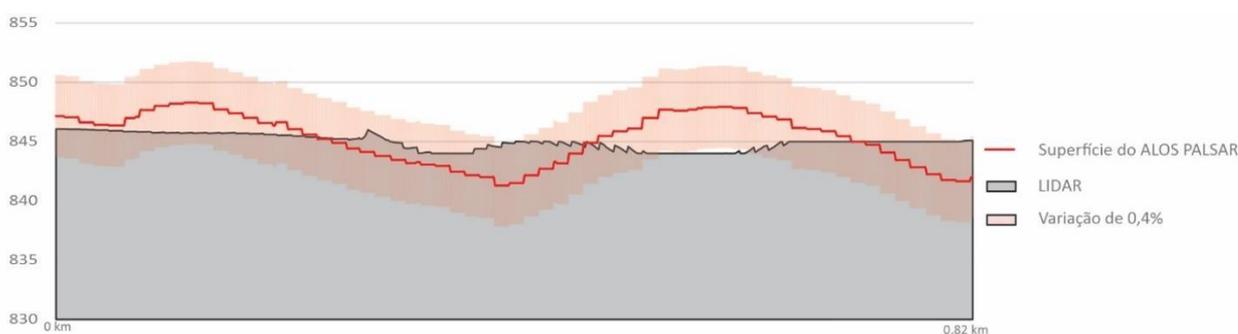
6.4.2 Análise dos Perfis de relevo: Os traçados do PERFIL 3

Para a análise do traçado do PERFIL 3 (Figura 12) foram gerados 36 perfis de relevo (Apêndices G, H e I) referente as superfícies interpoladas com dados do ALOS-PALSAR, na área pré-selecionada número 3 (Figura 11). Tal área possui uma composição de formas de relevo bem suaves com uma amplitude altimétrica baixa, características básicas de uma planície

de inundação, e com uma composição de uso e cobertura da área, na época do levantamento, desprovida de vegetação e/ou edificações.

Tal perfil nesta área, foi realizado a fim de verificar o comportamento dos MDE gerados com dados derivados do sensor ALOS-PALSAR, na representação das anuências em locais de planícies as quais variações dos relevos normalmente são bem mais sutis. Essa tentativa de avaliar o desempenho dos MDE gerados com dados derivados do sensor ALOS-PALSAR demonstrou resultados interessantes (Figura 26).

Figura 26 - Traçado referente ao PERFIL 3, demonstrando a superfície derivada dos dados do ALOS-PALSAR e LIDAR além da faixa de variação percentual de ambas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De maneira geral, em valores percentuais das diferenças entre os MDE dos PERFIL 3 gerados, obtiveram os menores valores de variação em relação a altimetria da superfície base de comparação do LIDAR, com cerca de 0,4%. Isso em termos quantitativos em um primeiro momento poderia suscitar uma interpretação que em áreas de planícies foram as que obtiveram o melhor desempenho na representação das formas de relevo nos perfis traçados.

Contudo, apenas a análise da variação entre ambas as superfícies não é o suficiente para determinar as potencialidades dos MDE em trabalhar nesta configuração de feições. Pois as áreas de planícies no geral são marcadas por relevos com declividades muito suaves, e assim qualquer alteração, por mais que percentualmente pareça pequena, vai em um contexto geral se destacar na linha do horizonte como uma rugosidade expressiva da paisagem.

De maneira que se já foi discutido nas análises qualitativas dos subprodutos dos MDE interpolados, as áreas de planície representavam informações de declividade com classes descontínuas e difusas, em comparação com a declividade gerada com dados do MDE LIDAR. As análises da configuração das formas dos perfis de relevo nas áreas de planície revelaram um pouco mais sobre essa realidade, ao transmitir de outro ângulo como se distribui tal comportamento na modelagem da superfície nestas áreas. As quais os MDE derivados do

ALOS-PALSAR mesmo quando interpolados para melhores resoluções espaciais, devido a uma limitação dos dados originais não são capazes de acompanhar superfícies mais planas.

6.5 ANÁLISE DOS PERFIS DE RELEVO REAIS: CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FORMAS, TIPOS DE COBERTURAS E SUA INFLUÊNCIA NA REPRESENTAÇÃO DO RELEVO

Nas análises dos perfis reais dos traçados levantados em campo, foram gerados 12 perfis, referente a cada um dos traçados previamente delimitados e métodos de interpolação analisados ao longo da pesquisa nas resoluções espaciais de 10m, 8m e 6m, totalizando 108 perfis de relevos (Apêndice I, J, K, L, M, N, O, P, e Q) os quais foram sobrepostos sobre o perfil gerado com os dados levantados em campo com o GPS Geodésico, que foi usado como parâmetro de controle de qualidade para aferir a precisão dos MDE interpolados do ALOS-PALSAR, no lugar dos dados altimétricos do LIDAR, usados até então.

Assim, como nos traçados dos perfis virtuais, não foi observado uma diferença considerável entre as formas de representação do relevo entre os métodos de interpolação, independente das resoluções espaciais, quando comparadas entre si e balizadas sobre a superfície de controle gerada com os dados levantados em campo através do GPS Geodésico. Diante disso, as análises dos perfis reais, também se pautarão sobre cada um dos traçados (como executado nos perfis virtuais) e não em cada uma das resoluções espaciais como feito nas análises dos MDE e seus subprodutos.

Diferente dos perfis virtuais, que foram traçados com um comprimento maior (o que causa uma generalização em sua representação devido a escala), os perfis reais foram delimitados com um comprimento reduzido não ultrapassando os 500m. Isso se justifica pela própria complexidade da execução do levantamento em meio a pandemia de COVID-19, que limitou a mobilização de pessoal para esse trabalho.

Entretanto, se por um lado os perfis mais curtos oferecem uma amostra para a análise um pouco menor, esses são capazes de sofrer menos com o processo de generalização na representação dos relevos, possibilitando assim a análise em maior detalhe das representações das formas.

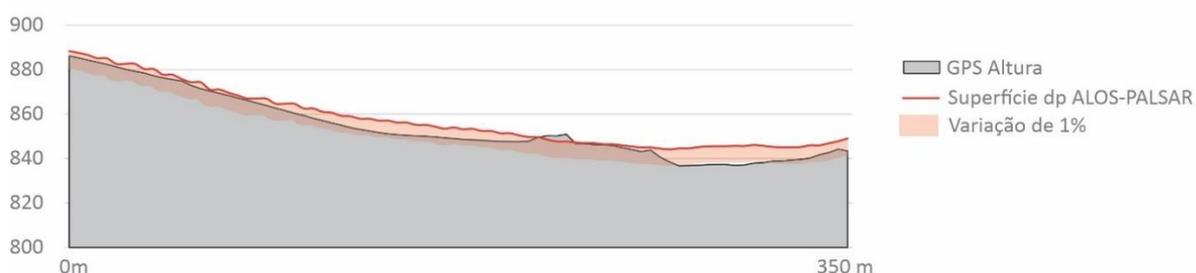
Pois o traçado da BR 440 por exemplo, o qual se aproxima em localização das áreas pré-selecionadas referentes ao perfil virtual 3, as variações apresentadas flutuam em 1% a altimetria geral da área (figura 27), mas o maior detalhamento na representação deste perfil

permite observar que essa variação na realidade está relacionada com mudanças bruscas no relevo que os dados do ALOS-PALSAR não são capazes de computar e/ou acompanhar.

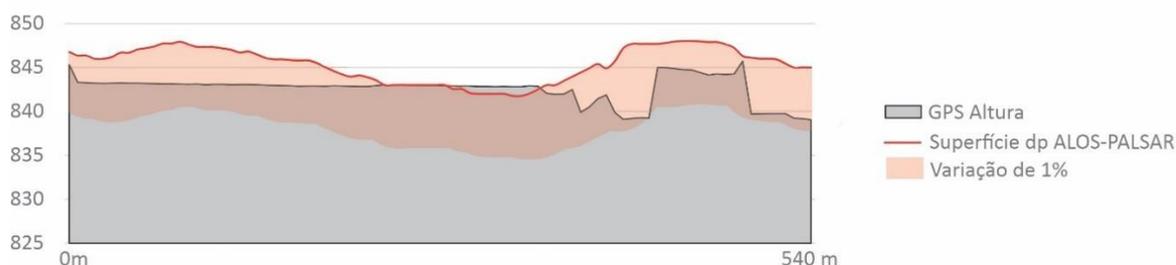
Essa mesma limitação é possível de ser observada nos perfis reais do ALPHA VILE e PASTO, os quais mesmo que as formas representadas acompanhem de maneira geral o perfil medido em campo, acabam passando despercebidos por pequenos detalhes entalhados na forma das vertentes (figura 27).

Figura 27 - Esquema representativo da variação percentual dos MDE do ALOS em relação aos perfis medidos em cada um dos traçados dos perfis reais analisados

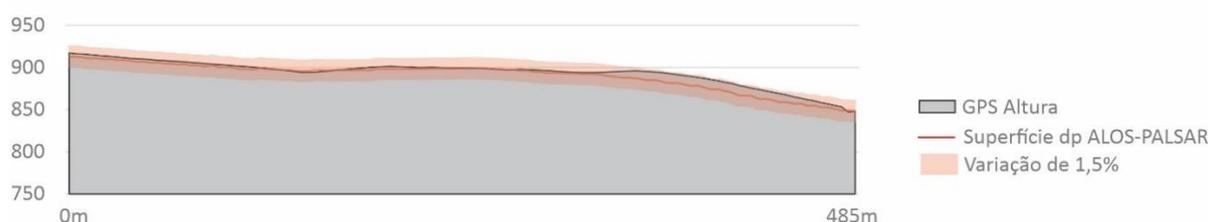
Perfil ALPHA VILE



Perfil BR 440



Perfil PASTO



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.5.1 Análise dos Perfis de relevo: Os traçados do perfil ALPHA VILE

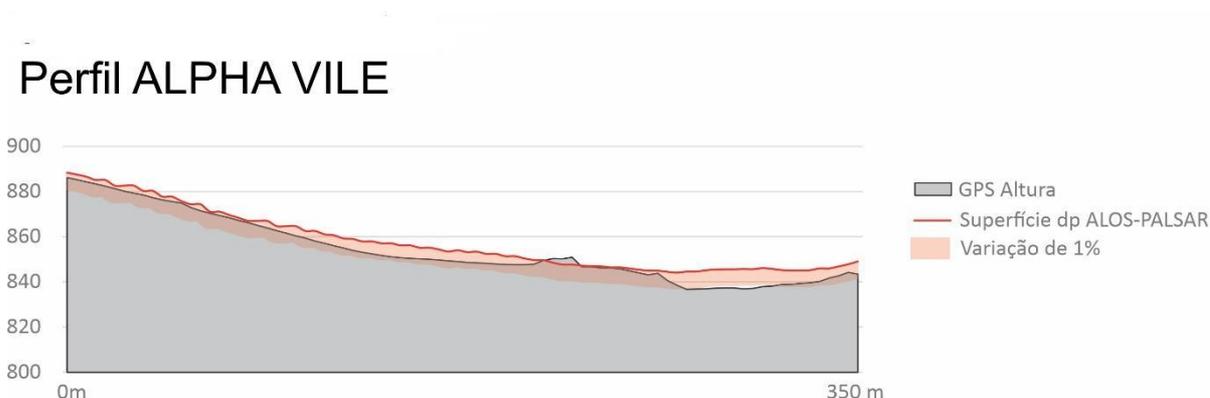
Para a análise do perfil ALPHA VILE (Figura 13) foram gerados 36 perfis (Apêndices J, K e L) de relevo referente as superfícies interpoladas com dados do ALOS-PALSAR, na área pré-selecionada número 1 (Figura 11). Tal área como já destacado anteriormente, possui uma composição de formas de relevo bem rugosas com amplitudes altimétricas consideráveis com uma cobertura vegetal de pastagens, com um dossel de pouca capacidade de promover uma interferência considerável nos dados obtidos pelo sensor do ALOS-PALSAR.

De maneira global, o perfil ALPHA VILE (figura 28) foi capaz de demonstrar em uma escala de menor generalização, já é que um perfil relativamente curto, apresentando um bom acompanhamento de todos os MDE interpolados do ALOS-PALSAR, devido a ser um local com ondulações mais suaves e com pouca cobertura vegetal.

Mas se torna cada vez mais evidente que os MDE derivados do ALOS-PALSAR, mesmo quando interpolado para melhores resoluções espaciais, se mostram incapazes de registrar todas as micro características de uma vertente, devido a qualidade dos dados originais de entrada, como já discutido anteriormente (figura 25).

Todavia essa insuficiência observada nos MDE do ALOS-PALSAR interpolados para outras resoluções espaciais, não invalida de forma geral sua aplicação e uso, uma vez que mesmo com essas assimetrias, se manteve bem próxima ao real o modelado do relevo. Isso demonstra que em locais de morfologia, uso e cobertura semelhante a área do perfil ALPHA VILE, onde ocorrer uma carência de produtos topográficos de melhor qualidade, os produtos do ALOS-PALSAR podem ser empregados se o escopo da análise permitir que sejam admitidas suas limitações na representação do relevo.

Figura 28 - Traçado referente ao perfil ALPHA VILE, demonstrando a superfície derivada dos dados do ALOS-PALSAR e dados levantados em campo além da faixa de variação percentual de ambas.



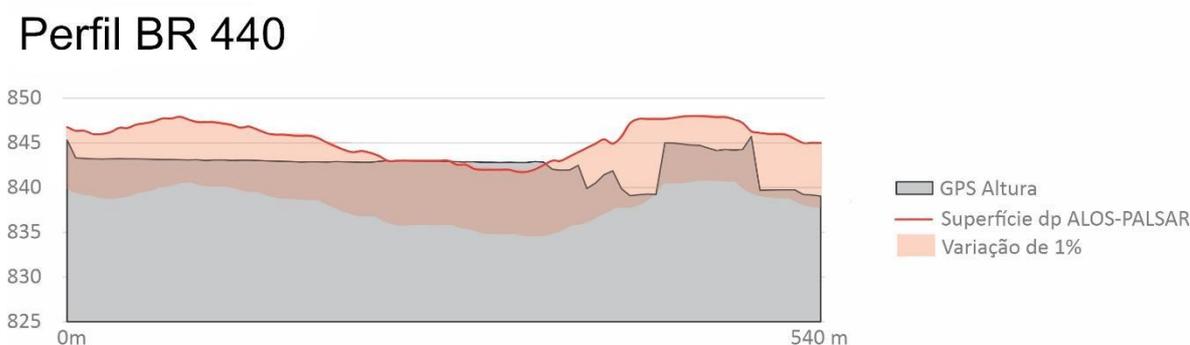
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.5.1 Análise dos Perfis de relevo: Os traçados do perfil BR440

Para a análise do traçado perfil do BR 440 (Figura 13) foram gerados 36 perfis de relevo (Apêndices M, N e O) representando as formas do traçado nos MDE interpoladas com dados do ALOS-PALSAR, na área pré-selecionada número 3 (Figura 11). Como já discutido anteriormente essa área pré-selecionada possui uma composição de formas de relevo bem suaves com uma amplitude altimétrica baixa, características básicas de uma planície, e com uma composição de uso e cobertura da área, desprovida de vegetação e/ou edificações.

O perfil BR 440 (figura 29), compartilha a área do perfil virtual 3 que demonstrou a menor variação relativa, contudo como se encontrava em uma área mais plana qualquer alteração mínima na morfologia local passa a se destacar na paisagem. Neste sentido, considerando as informações dos subprodutos dos MDE, dos perfis virtuais e agora do perfil real, fica claro que existe um grande desafio na utilização de dados dos MDE do ALOS-PALSAR interpolados e seus subprodutos, para promover análises e/ou modelagens que se concentrem em áreas mais planas.

Figura 29 - Traçado referente ao perfil BR 440, demonstrando a superfície derivada dos dados do ALOS-PALSAR e dados levantados em campo além da faixa de variação percentual de ambas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, o perfil da BR 440 possibilitou que fosse observado como parte das variações que os MDE o ALOS-PALSAR apresenta nas áreas planas, são influenciadas pelas próprias formas ao longo do traçado, como demonstrado pelo traçado medido pelo GPS. Pois ao analisar o traçado mais ao final do perfil da BR 440, é possível constatar que o modelado feito com os dados do ALOS-PALSAR tenta acompanhar o traçado da superfície, mas o faz de forma grosseira (figura 29).

Desta maneira tanto os perfis virtuais e reais, passam a demonstrar como em áreas mais planas os produtos do ALOS-PALSAR interpolados não seriam uma boa alternativa. Uma vez que no processo de representar ou modelar informações destas áreas, os dados são modificados gerando uma superfície diferente da realidade. Por mais que apenas 1% de variação, no perfil BR 440 (figura 29) pareça pouco, é preciso voltar a sustentar que em uma área plana, as pequenas variações no relevo se destacam na paisagem, podendo modificar as dinâmicas naturais atuantes naquela área.

Assim, a utilização de um MDE que de alguma forma altere a geomorfologia nestas áreas da maneira que acontece com o ALOS-PALSAR, em análises ambientais em gerais pode induzir a conclusões equivocadas do pesquisador, colocando em xeque toda uma pesquisa.

6.5.1 Análise dos Perfis de relevo: Os traçados do perfil PASTO

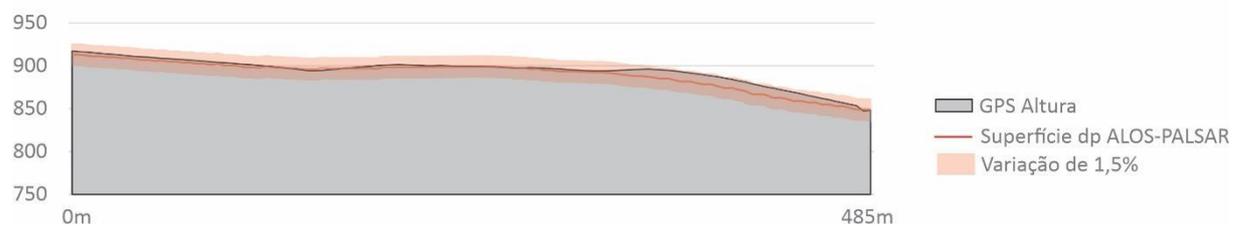
Para a análise do último traçado dos perfis reais, foi investigado o perfil PASTO (Figura 13) nesta etapa foram gerados também 36 perfis (Apêndices P, Q e R) de relevo referente as superfícies interpoladas com dados do ALOS-PALSAR, na área pré-selecionada número 1 (Figura 11). O perfil PASTO compartilha a área pré-selecionada 1 com o perfil ALPHA VILE, sendo a área marcada por composição de formas de relevo bem rugosas com uma boa diferença altimétrica de cobertura arbórea rala, como já destacado.

O perfil PASTO (figura 30), entre todos os perfis reais levantados, foi aquele que demonstrou uma maior capacidade de se adequar a superfície mensurada pelo levantamento com o GPS. Tal comportamento corrobora com o observado traçado do Perfil 2 que entre os perfis virtuais foi aquele que conseguiu ter uma maior conformidade com a superfície de referência do LIDAR com resolução espacial de 1m.

Por mais que a variação geral do perfil PASTO seja superior a todas as demais (variando 1,5% do valor da altimetria), essa variação se concentra em uma pequena porção do relevo a qual o ALOS-PALSAR não foi capaz de acompanhar a mudança sutil no arredondamento da curvatura da vertente. Entretanto essa pequena variação, não se mostra como uma barreira para o uso do ALOS-PALSAR, mesmo interpolado, em áreas com uma composição geomorfológica e de uso e cobertura semelhante. Já que a forma geral das vertentes acompanhou de forma impressionante as medições em campo.

Figura 30 - Traçado referente ao perfil PASTO, demonstrando a superfície derivada dos dados do ALOS-PALSAR e dados levantados em campo além da faixa de variação percentual de ambas.

Perfil PASTO



Fonte: Elaborado pelo autor.

7 CONCLUSÕES

7.1 A LIMITAÇÃO INTRÍNSECA DOS MÉTODOS DE ABORDAGEM TRADICIONAL NA COMPARAÇÃO ENTRE MDE.

De modo geral, foram observadas semelhanças entre todos os produtos gerados, independentemente do método de interpolação usado. Tal comportamento corrobora as colocações de Miranda (2017), que analisou um comportamento homogêneo dos resultados de testes estatísticos em relação a métodos de interpolação em situações cujo número de pontos amostrais era muito elevado (entre 250 e 3.000).

Considerando-se que as variações do número de pontos amostrais, de acordo com a resolução espacial de saída nos MDE desta análise, flutuam entre 500 (para a resolução espacial de 10m), 624 (para a resolução espacial de 8 m) e 832 (para a resolução espacial de 6m) em uma área de 25km², os resultados dos testes de correlação e da teoria de erros acompanharam as colocações de Miranda (2017). Frente a essa realidade, alcançou-se uma sequência de avaliações de correlação e de medidas de erros entre os MDE, cujos resultados convergem para uma equidade geral entre os interpoladores, independentemente da melhora na resolução espacial a que são submetidos, todos resultando em correlações **muito fortes** entre os conjuntos de dados.

Contudo, por mais que ocorra uma equidade geral dos interpoladores, de acordo com a modificação das resoluções espaciais, é possível observar através das pequenas diferenças entre os resultados dos testes de correlação e dispersão, que no processo de geração dos MDE com maiores resoluções espaciais, derivados dos dados do ALOS-PALSAR, os interpoladores passam a transferir suas características intrínsecas, tanto teóricas e práticas, para a nova superfície modelada.

Observando os MDE nas resoluções espaciais de 10m, onde a inferência dos valores desconhecidos é menor, haja vista que o aumento da resolução espacial foi relativamente pequeno, aquele interpolador que tem como característica central a utilização de valores locais para a modelagem, sem se valer de médias de toda a população de dados, passa a gerar uma superfície mais consistente com o MDE usado de parâmetro para a comparação.

Ao promover o avanço do aumento da resolução espacial dos MDE, a utilização apenas dos valores locais não se mostra mais suficiente, passando a ser necessário se valer de médias gerais para ajustar melhor as superfícies, visto que as áreas de inferência de valores desconhecidos se expandem assim, como as incertezas dos valores interpolados. Neste

momento as médias e os valores de dispersão calculados pela Krigagem Universal Quadrática e a sua normalização por meio de polinômios simples, se tornam um bom ponto de ancoragem para a inferência dos valores das superfícies nos MDE na área de estudo, obtendo então os melhores resultados.

Porém a potencialidade desta pesquisa se encontra no processo de escolhas das amostras e pontos de controle a fim de fundamentar uma análise estatística, o que vem ao encontro do ponto mais sensível a esse tipo de estudo, o modo de a seleção e definição do tamanho das amostras para a análise. Isso porque o tamanho de uma amostra, assim como a qualidade dos pontos amostrais, vai influenciar a todo o processo de inferência e modelagem dos dados observados.

Essas discussões sobre como devem ser os tamanhos e formas de seleção dos pontos de controle amostrais, na história da estatística fundamentou diversas disputas na história das análises estatística, como foi discutido na revisão teórica.

Neste sentido, essas disputas ainda continuam, já que para a avaliação da qualidade estatística de um produto cartográfico como os MDE, no Brasil os estudos até 2015 em sua maioria, se valiam de um determinado número de pontos amostrais para o cálculo do tradicional Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) como recomendado pelo decreto nº 89.817 de 20 de Junho de 1984, o qual para produtos feitos em meio digital após 2015, esse decreto passou a ser substituída pela norma do Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (ET-ADGV-DEFESAFT - MINISTÉRIO DA DEFESA DO BRASIL, 2015). E além dos padrões oficiais brasileiros, os estudos ainda poderiam se valer de outros índices, já que existem outras diversas formas de verificação da qualidade destes produtos:

Tanto o PEC e o PEC-PCD, quanto as análises de tendência e precisão têm em comum o fato de que a distribuição utilizada pela variável aleatória de estudo tem que ser normal. Todavia, isto não pode ser considerado sempre como verdade. Em normas e artigos internacionais, percebe-se que as discrepâncias altimétricas em dados geoespaciais podem não ter, necessariamente, distribuição normal... Modelos Digitais de Elevação possuem diversas fontes de incertezas que geram valores outliers aos dados. Estes valores perturbam os resultados de medidas estatísticas e podem causar desvio da distribuição normal. Em relação às normas e padrões internacionais, percebe-se que a questão de ser ou não normal vem evoluindo de acordo com o tempo (DE CARVALHO; SILVA, 2018, p. 733–734)

Neste sentido, passam a existir outras metodologias propostas para esse tipo de análise como *United States Map Accuracy Standards* (1947), *Accuracy Standards for Large-Scale Maps* (1990), *Digital Elevation Model Standards* (1997), *Geospatial Positioning Accuracy Standards* (1998), *Guidelines for Digital Elevation Data Guia* (2004), *Guidelines Vertical Accuracy Reporting for LIDAR Data* (2004), *Positional Accuracy Standards for Digital*

Geospatial Data (2014) (DE CARVALHO; SILVA, 2018), as quais sua aplicação na avaliação de produtos cartográficos é aplicada de acordo com agência governamental ou privada que detém os dados ou que executou o levantamento.

Contudo, por mais que haja diversas formas de mensurar a qualidade de um MDT, em geral as metodologias vão se valer de um determinado número de pontos de controle, a fim de compara-los com a superfície modelada para verificar a dispersão e conformidade dos dados, definindo assim a qualidade deste produto. A metodologia proposta pela USGS em 1997 para a avaliação de MDE por exemplo, denominada *Digital Elevation Model Standards*, preconiza que para a avaliação de um MDE seja válida é preciso que no mínimo se utilize 28 pontos de controle para a avaliação da posição e altimetria.

Pode-se compreender então, que a escolha dos locais desses pontos de controle, são uma questão chave para o resultado final da avaliação dos MDT, em outras palavras entendendo que os interpoladores vão ter comportamentos distintos de acordo com a distribuição dos dados, por mais que bem selecionados os pontos de controle, esses podem acabar induzindo um melhor ou pior resultado a determinado interpolador.

No caso mais específico do ALOS-PALSAR, como observamos a ocorrência de uma baixa competência geral do MDE em modelar as superfícies mais planas, se um número maior de pontos de controle acabasse se concentrando nesta área, reduziria a qualidade do MDE por exemplo, e de forma inversa aconteceria o mesmo problema se os pontos tendessem a se localizar em áreas de declividade média, atribuindo ao MDE uma impressão de qualidade maior do que a que ele possui na realidade.

Neste sentido, a utilização de um modelo originalmente com maior resolução espacial como parâmetro de comparação (LIDAR), capaz de cobrir toda a superfície modelada, se mostrou uma forma de contornar o processo de escolha de pontos de controle, que poderia (teoricamente) gerar uma análise tendenciosa, já que ao usar toda a área de estudo se substitui as incertezas de utilizar amostras pela totalidade o universo observado.

É evidente que nem sempre é possível, ao fazer um levantamento, ter um número de pontos de controle tão grande quando a própria área levantada, levando em consideração a viabilidade do projeto em relação ao tempo e custos humanos e financeiros, entretanto nas análises que se ocupam da comparação entre dois MDE de fontes distintas, os quais a manipulação dos dados em ambientes virtuais é factível de ser executada com certa fluidez, passa a ser aconselhado que sejam comparadas a totalidade das superfícies de forma integral, sem a seleção de um número X de pontos amostrais.

Avançando para além das análises propriamente ditas, além da maioria dos trabalhos brasileiros que buscam a comparação entre dois MDE se valerem de amostras para o cálculo da PEC e da PEC-PCD, não ocorre uma preocupação (de maneira geral) em analisar as informações derivadas destes MDE. Esse tipo de análise integrada se mostrou interessante a fim de estabelecer uma avaliação cruzada entre as células vizinhas e compreender a consistência das informações extraídas dos dados daqueles MDE interpolados.

Pois ao serem observadas as informações geradas de declividade, derivadas do MDE interpolados com o método Spline regularizado, seus valores máximos se mostraram em todas as resoluções espaciais, bem mais próximos aqueles registrados pela declividade derivadas do MDE do LIDAR, mesmo que esses MDE gerados por Spline regularizados, não terem obtidos os melhores resultados nos testes de correlação e de inferência espacial.

Isso demonstra, que deve haver uma preocupação em para além de comparar os MDE em si estatisticamente, é preciso se atentar para as informações que são derivadas deste MDE tanto de maneira discreta, assim como qualitativa. Compreendendo que nas análises espaciais, os MDE nunca são produto final nos estudos, na realidade eles são os dados iniciais para gerar outras informações. Ainda a geração e análise dos perfis de relevo para a análise das formas, foram um bom exemplo da necessidade de avaliações quali-quantitativas. Já que de maneira geral os perfis de relevo, não são materiais que usualmente empregados em análises de MDE, contudo são capazes de descrever o comportamento dos ruídos ao longo das vertentes e estabelecer possíveis relações com as composições das formas e tipos de cobertura.

Portanto, reitera-se a relevância de trabalhos que se ocupem da comparação entre MDE de levantamentos distintos e dos métodos de interpolação na sua geração, por meio de testes estatísticos, como demonstra a extensa bibliografia com estudos teóricos e práticos nesta temática. Mas é necessário que os trabalhos para além do simples e frio cálculo matemático, passem a se preocupar em promover avaliações integradas de índices quantitativos e também avaliações qualitativas dos subprodutos, como a declividade, hipsometria e perfis de relevo.

Já que ao longo da pesquisa tais avaliações se mostraram capazes de promover uma compreensão mais apurada do comportamento no processo de interpolação dos dados na modelagem do relevo, no que se refere a tentativa de aumento da resolução espacial de MDE. E foram além disso, estabelecendo uma visão mais totalizante dos problemas e a possível localização das assimetrias mais graves.

Estes esforços consistem na tentativa de romper com o ideário a imperar no senso comum, assim como também em alguns círculos acadêmicos, de que os valores obtidos através de formulações matemáticas se configuram como verdades absolutas, impassíveis de serem

discutidas ou de gerarem resultados inconsistentes com a realidade observada. A fim de não repetir os erros do passado dentro da Geografia, que sem uma visão crítica dos modelos e da estatística, aceitavam e defendiam o uso de modelos ruins mas com uma boa estatística (GREGORY, 1992) os quais resultaram em um estigma a essas abordagens atualmente na Geografia Brasileira.

7.2 AS LIMITAÇÕES DOS RESULTADOS OBTITVOS NESTA ANÁLISE DE INTEPOLADORES E MDE

No processo de pesquisa, é preciso ter em mente as limitações teóricas e práticas em que a pesquisa e o pesquisador esbarram, compreendendo que o processo de evolução do saber científico perpassa por constantes revoluções, na qual a cada um destes avanços contribui para a construção de uma ciência mais forte e consistente (KUHN, 2017). Então sempre nos trabalhos científicos são expostas por seus autores as potencialidades e seu caráter inovador, entretanto por conta do temor da crítica ou do orgulho nocivamente presente no meio acadêmico, raramente se encontra um subtítulo, capítulo ou nota de rodapé expondo de alguma forma as limitações que estão presentes em sua metodologia, concepções teóricas ou até mesmo nos resultados finais de uma pesquisa.

A clara explanação desta realidade é um passo importante do processo de pesquisa, uma vez que permite de forma honesta alertar os colegas pesquisadores sobre qual seria um bom próximo passo para os futuros trabalhos que se interessarem em debruçar sobre a mesma temática podem seguir. Neste sentido, a fim de contribuir para que tal costume seja estimulado entre os pesquisadores, foi reservado esse breve tópico para expor as limitações desta presente pesquisa.

Trabalhos como os de Quina (2019); Gomes, Caraméz e Zaidan (2019); Neuman, Silveira e Sampaio (2018); Rocha et al. (2017); Naissinger e Thum (2017); Viana (2017); Miranda (2017); Da'Silva et al. (2015); Iorio et al (2012); Torlay, Victoria e Oshiro (2011), Chagas et al (2010) entre tantos outros autores, que já se debruçaram sobre o estudo dos MDE e sua comparação com outros produtos. Mas ao realizarem suas comparações sempre esbarram em um mesmo fator limitador, assim como essa presente dissertação, pois vão executar comparações entre dois ou mais MDE em uma mesma área de estudo e/ou contexto geomorfológico.

Tal comportamento geral, estabelece as colocações e/ou conclusões quanto à qualidade, acurácia e precisão do processo de comparação entre os MDE analisados, de alguma forma se

restringem aos locais que possuem uma composição geomorfológica semelhante a área de estudo destes trabalhos. Isso porque Micelli (2011), um dos poucos estudos a comparar MDE em dois contextos geomorfológicos distintos, demonstrou que de acordo com o domínio geomorfológico, padrão de distribuições geral de feições de relevo, uso e tipo de cobertura um mesmo MDE pode ser capaz de apresentar desempenhos diferentes.

Neste sentido, ao estabelecer uma comparação apenas em relevos mamelonizados, característicos do domínio geomorfológico dos Mares de Morro (AB`SÁBER, 2003) a pesquisa busca salientar que seus resultados e conclusões sobre a qualidade dos MDE do ALOS-PALSAR, de seus subprodutos (Declividade e Hipsometria) assim como dos perfis de relevo, se limitam a esse contexto geomorfológico, os quais seus resultados poderiam ser modificados para uma maior ou menor conformidade entre os MDE, caso a geomorfologia local fosse outra.

De maneira mais prática, como foi visto a maior deficiência dos MDE do ALOS-PALSAR e de seus subprodutos é a representação de relevos mais suaves e planos, que normalmente são as planícies de inundação de uma bacia, em contrapartida em relevos mais escarpados o seu desempenho é um pouco melhor. Assim é possível imaginar que se caso forem aplicados os MDE do ALOS-PALSAR para o mapeamento de áreas com relevos mais escarpados, como no caso a região da Serra do Mar do Rio de Janeiro, seus resultados seriam em teoria mais consistentes do que se houvesse sua aplicação em relevos mais suaves, como na baixada fluminense na região do Grabem da Guanabara.

Entretanto, para que o processo de comparação de MDE se dessem em diferentes contextos geomorfológicos é evidente que seria necessária uma grande gama de recursos financeiros, materiais e de pessoal especializado, os quais nem sempre estão à disposição para serem empregados e operacionalizados nos projetos de pesquisa de mestrados e/ou doutorandos, sem o apoio de um grande instituto ou departamento do governo. Neste sentido, por mais que haja limitações o que se refere a diversificação das áreas de estudo, para uma comparação integrada entre diversos contextos geomorfológicos, é uma limitação extrínseca ao pesquisador e ao processo de pesquisa.

7.3 É VÁLIDO O PROCESSO DE INTERPOLAÇÃO PARA PROMOVER MELHORAS NA RESOLUÇÃO ESPACIAL DOS MDE?

Primeiramente é possível concluir que não ocorre ganhos reais com o processo de interpolação para resoluções espaciais com maior detalhe, independentemente do método de interpolação usado. Esse comportamento é simples de compreender já que é impossível criar

informação do nada, neste sentido por mais que se reduza o tamanho dos pixels para gerar os novos MDE, através da aplicação de diversos métodos de interpolação cada qual com suas potencialidades e desafios, a fonte original sempre serão dados com uma resolução espacial de 12,5m onde as suas insuficiências passam a ser replicadas para os demais MDE gerados a partir deles.

E por mais que não haja ganhos é possível mensurar as perdas que ocorrem ao longo do processo de aumento da resolução espacial destes produtos. Dando subsídios para o pesquisador que opte por usar destas técnicas na geração de um MDE de melhor resolução, tenha a plena consciência do aumento do grau de incerteza das informações que está gerando, ao interpolar um MDE para outra resolução espacial. Podendo assim, frente ao seu senso crítico de acordo com a temática trabalhada, optar ou não, pela aplicação destas técnicas e utilização dos produtos e subprodutos deste processo em seu estudo.

É possível acreditar que de acordo com a posição da vertente em que o estudo se ocupe, as discrepâncias que ocorrem durante o processo de aumento da resolução espacial dos MDE, acabem não interferindo de forma tão consistente nos resultados de suas análises já que os erros, como já foi visto nas etapas anteriores, tendem a se concentrar em determinados lugares ao longo das vertentes.

Exemplificando, foi observado que ocorre uma boa conformidade nas formas e informações geradas nas áreas com relevos mais acidentados, principalmente referente as informações de declividade. E mesmo que em alguns casos os valores máximos sejam subestimados, causando uma supressão das dimensões das áreas de maior declividade, os materiais são capazes de localizar a posição com bastante precisão as áreas com os maiores valores de declividade.

Desta forma, esses MDE interpolados para maiores resoluções espaciais não trariam consigo grandes desafios para serem aplicados em estudos de movimentos de massa, como por exemplo os escorregamentos. Isso porque os escorregamentos tendem a ocorrer em relevos mais trabalhados com declividades acentuadas, locais exatamente onde o ALOS-PALSAR demonstrou uma boa conformidade, assim o erro agregado ao processo de interpolação para a geração de um MDE mais preciso a esse tipo de análise, não resultaria em uma incerteza tão grande no resultado final.

Em contrapartida a aplicação do mesmo conjunto de técnicas, na mesma área, em um mesmo MDE do ALOS-PALSAR a fim de modelar eventos como inundações ou alagamentos, resultaria em um estudo com um grau de incerteza maior sobre seus resultados. Pois ao observar a distribuição dos locais com maiores assimetrias nos MDE e subprodutos derivados da

interpolação do ALOS-PALSAR, as áreas com menor altimetria e declividades mais suaves são os locais com os piores índices de acerto, conseqüentemente são essas regiões que possuem uma forte tendência a ocorrência deste tipo de evento.

A compreensão destes fatores é fundamental para o correto emprego de um MDE interpolado do ALOS-PALSAR para maiores resoluções espaciais. O pesquisador que se propuser a fazer o emprego de tais técnicas, deve equacionar as perdas no MDE durante o processo, levando em consideração a composição geomorfológica do relevo na área de estudo, a sua temática de pesquisa.

Então responder se ocorre ou não a possibilidade de interpolar o ALOS-PALSAR para maiores resoluções espaciais, não é uma resposta dicotômica entre sim e não, mas na realidade é uma análise caso a caso a fim de estabelecer de forma coerente o grau de erro e/ou perdas que são admitidas no resultado final de uma análise. E acima de tudo, ao aplicar tais técnicas de aumento da resolução espacial, é necessário ao pesquisador ou técnico a capacidade de analisar os erros intrínsecos e extrínsecos presentes no processo e explicitá-los em sua metodologia e/ou resultados, a fim de alertar aos demais pesquisadores, que utilizarem seu trabalho e/ou metodologia das potencialidades e limitações de sua pesquisa.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo inicial desta pesquisa era responder se ocorre a possibilidade de interpolar os produtos do ALOS-PALSAR para resoluções espaciais com maior detalhe, o que possibilitaria de maneira geral um novo leque para estudos de fenômenos que só podem ser observados em um nível de detalhe maior, que muitas vezes tem suas áreas de estudo limitadas pela falta de bases cartográficas contínuas no país com esses requisitos precisão. E neste sentido foi possível concluir, que o processo de interpolação dos dados dos MDE do ALOS-PALSAR, pode ser executado desde que seja assumido os erros, generalizações e perdas de informação inerentes a toda tentativa de gerar produtos com resoluções espaciais de maior detalhe que 12,5m, tendo como origem dados com 12,5m de resolução espacial.

Por conta disso, é essencial que ocorra uma formação aprimorada dos pesquisadores e técnicos a fim de compreenderem essas dinâmicas que formam todo o processo que vai desde o levantamento bruto das informações em campo, processamento dos dados, a até serem finalizadas no uso do MDE ou de seus subprodutos em um estudo científico.

Contudo, no bojo desta formação aprimorada se encontram o letramento de diversos conhecimentos estatísticos básicos para a análise espacial como também aplicações de inferência espacial, correlação entre outros. E como foi visto ao longo da revisão bibliográfica, para os geógrafos brasileiros devido as revoluções científicas iniciadas ainda na década de 70, ocorreu um certo distanciamento do ensino destes conhecimentos, o que atualmente passa a limitar a capacidade destes profissionais a empreender esse tipo de estudo.

Diante disso para que um Geógrafo empreenda essas avaliações, como é o caso desta dissertação, passa a ser necessário um esforço a fim de assimilar todas as variáveis estatísticas e matemáticas necessárias para operacionalizar tais análises. Entretanto, se a falta de um sólido conhecimento estatístico em um momento inicial se mostra uma deficiência, os conhecimentos de geomorfologia, modelagem de sistemas ambientais, pedologia, Geologia, Cartografia entre outros, promove uma capacidade de compreensão e análise das assimetrias encontradas o que resulta em uma capacidade explicativa e de correlação dos fatores geográficos as quais influenciam na ocorrência destes ruídos, que raramente são vistas em trabalhos que se ocupam na avaliação de dados dos em MDE.

E quando se consegue equilibrar o conhecimento estatístico e o conhecimento das dinâmicas que compõem o relevo, é possível deixar de executar trabalhos apenas estatísticos sobre a acurácia do MDE, que vão demonstrar apenas os valores quantitativos, ou apenas qualitativos que vão dizer a localização das assimetrias e suas componentes geográficas, os

quais não são capazes de conversar entre si. Para assim então construir estudos mais completos, capazes de apresentar tantos dados quantitativos como aqueles qualitativos, gerando trabalhos mais totalizantes e integrados a realidade analisada com maior impacto e capacidade de interlocução interdisciplinar com outros ramos do conhecimento.

E a Geografia tem um grande potencial para esse tipo de análise, uma vez que seu caráter híbrido entre as ciências naturais, exatas e humanas lhe permite enxergar mais longe sobre os ombros destes gigantes. Pois no seu processo de construção como ramo do conhecimento, criou lentes metodológicas únicas a sua formação, que capacitam o geógrafo observar interligações que fogem aos outros campos do saber.

Mas para atingir todo o seu potencial, é necessário que a Geografia brasileira abandone os estigmas e traumas no que se refere ao uso da matemática, estatística, modelos, programação etc. a fim de materializar grandes avanços em suas análises, pois a quantidade de dados gerados atualmente é tão grande e as mudanças são tão rápidas, que o receio ou desconhecimento destas técnicas e formas de abordagem pela geografia brasileira, faz com que os Geógrafos tenham certa dificuldade em traduzir a tempo as mudanças na sociedade.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, N. A. **Domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 3. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/94538576/AB-SABER-Aziz-Nacib-Os-dominios-de-natureza-no-Brasil-potencialidades-paisagisticas>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- AGTERBERG, F. P. Georges Matheron: Founder of spatial statistics. **Earth Sciences History**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 325–334, 2004. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/24137099?seq=1>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- ANDRADE, M. De. A AGB e o pensamento geografico no Brasil. **Terra Livre**, São Paulo, n. 9, p. 143–152, 1991. Disponível em: <<https://www.agb.org.br/publicacoes/index.php/terralivre/article/download/110/108>>. Acesso em: 4 abr. 2020.
- ARANA, D. Avaliação De Métodos De Interpolação Para O Mapgeo2015. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO 2016, Recife - PE. **Anais...** Recife - PE: VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2016. Disponível em: <https://www3.ufpe.br/visimgeo/includes/Anais_final_10_09_16/artigos/Todos_Artigos/002_2.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- BARBOSA, D. D. da S. **PREVISÃO DE DEMANDA EM UM COMÉRCIO DE MÓVEIS E ELETRODOMÉSTICOS**. 2010. Universidade Federal de Juiz de Fora, [s. l.], 2010. Disponível em: <http://www.ufjf.br/engenhariadeproducao/files/2014/09/2010_3_Dimas.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- BARBOSA, L. C.; SÁ, L. A. C. M. De. DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA AUXÍLIO NA APRENDIZAGEM DA CARTOGRAFIA PARA ALUNOS DEFICIENTES VISUAIS NAS SÉRIES DE NÍVEL BÁSICO. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO 2016, Recife - PE. **Anais...** Recife - PE Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/309443319_DESENVOLVIMENTO_DE_UM_APLICATIVO_COMPUTACIONAL_PARA_AUXILIO_NA_APRENDIZAGEM_DA_CARTOGRAFIA_PARA_ALUNOS_DEFICIENTES_VISUAIS_NAS_SERIES_DE_NIVEL_BASICO>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- BARROS, F. M. A. De. **INTERPOLAÇÃO DE IMAGENS USANDO REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS**. 2009. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://monografias.polli.ufrj.br/monografias/monopoli10001922.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- BASTOS, B. da C.; FILHO, L. E. Utilização Da Tecnologia Lidar Em Projetos De Engenharia De Infraestrutura Viária. In: XI CONGRESSO NACIONAL Y VIII LATINOAMERICANO DE AGRIMENSURA 2012, Villa Carlos Paz. **Anais...** Villa Carlos Paz Disponível em: <https://proceedings.science/proceedings/100063/_papers/97589/download/abstract_file1>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- BRASIL. **O PORTAL BRASILEIRO DE DADOS GEOESPACIAIS - SIG BRASIL: APRESENTAÇÃO**. [s.d.]. Disponível em: <<https://inde.gov.br/Inde/Apresentacao>>. Acesso em: 19 abr. 2020.
- BRAZARIAN, J. **O PROBLEMA DA VERDADE: TEORIA DO CONHECIMENTO**. 2. ed. São Paulo: EDITORA ALFA-OMEGA, 1985. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/367988723/BAZARIAN-Jacob-O-Problema-da-Verdade-pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- CÂMARA, G. Desenvolvimento de Sistemas de Informação Geográfica no Brasil: Desafios e Oportunidades. **Palestra proferida na Semana de Geoprocessamento do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, p. 1–11, 1996. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/present/segeo.html>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução a Ciência da Geoinformação. In: **Introdução à Ciência da Geoinformação**. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2004. p. 1–5.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. De. Modelagem De Dados Em Geoprocessamento. In: **Geoprocessamento em Projetos Ambientais**. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2004. p. 35.
- CAMARENA, M. T. Y. **LEYES, TEORÍAS Y MODELOS**. 2. ed. Mexico: Editora Trillas, 2002. Disponível em: <<https://libgen.pw/item?id=1502677&adblock=true>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; DE CARVALHO JÚNIOR, W.; SOUZA NETO,

N. C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 218–226, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n2/v14n02a14.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

CHAPMAN, S. J. **Programação em MatLab para engenheiros**. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016. Disponível em: <<http://compare.buscape.com.br/programacao-em-matlab-para-engenheiros-chapman-stephen-j-8522103259.html>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

CHILDS, C. **Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyts**. [s.l.: s.n.]. v. 2004 Disponível em: <<papers2://publication/uuid/7A4DAFEA-CE6C-44AE-9DC4-AE9B953BB87A>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. **Modelos Integrados em Geografia**. 1. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1974.

CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. **Modelos Físicos e de Informação em Geografia**. 1. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1975.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2007.

COSTA, R. M. **ESCORREGAMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO TAPERA , JUIZ DE FORA - MG**. 2016. Universidade Federal de Juiz de Fora, [s. l.], 2016.

CRUZ, R. A. Da. **Ronald Fisher e a eugenia: estatística, evolução e genética na busca da civilização permanente**. 2016. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <<https://tede2.pucsp.br/handle/handle/19448>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

CUNHA, E. R. Da; BACANI, V. M. Influência da resolução do MDE na caracterização morfométrica de bacia hidrográfica. **Caderno de Geografia**, [s. l.], v. 29, n. 59, p. 1029–1043, 2019.

DE CARVALHO, J. A.; SILVA, D. Métodos para avaliação da acurácia posicional altimétrica no Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 70, n. 2, p. 725–744, 2018.

DO CARMO, E. J.; RODRIGUES, D. D.; DOS SANTOS, G. R. Avaliação dos interpoladores krigagem e topo to raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de um “as built”. **Boletim de Ciências Geodesicas**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 674–690, 2015.

DOURADO, W. **Avaliação de Técnicas de Interpolação de Imagens Digitais**. 2014. Universidade Estadual Paulista, [s. l.], 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/115892>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

EMBRAPA. **SRTM - Shuttle Radar Topography Mission**. 2019a. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/srtm>>. Acesso em: 12 dez. 2019.

EMBRAPA. **ALOS - Advanced Land Observing Satellite**. 2019b. Disponível em: <www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_alos.html>. Acesso em: 7 abr. 2020.

EMBRAPA INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. **Sumula da X reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Informação Tecnológica, 1979.

ESRI. **História da Empresa**. 2011. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20090703135917/http://www.esri.com/company/about/history.html>>. Acesso em: 29 mar. 2019.

ET-ADGV-DEFESAFT - MINISTÉRIO DA DEFESA DO BRASIL. **NORMA DA ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS GEOESPACIAIS VETORIAIS DE DEFESA DA FORÇA TERRESTRE**. Brasília. Disponível em: <http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ADGV_Defesa-Forca_Terrestre_2015.pdf>.

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. Modelagem numérica de terreno. **Introdução à Ciência da Geoinformação**, [s. l.], p. 1–36, 2003. Disponível em: <<http://bibdigital.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/sergio/2004/04.19.14.52>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

FELGUEIRAS, C. A.; URASHIMA, C. A.; SOARES, M. L. C. P. GERAÇÃO DE MODELOS DE GRADE TRIANGULAR EM AMBIENTE DE MICROCOMPUTADOR. In: V SIMPÓSIO LATINOAMERICANO SOBRE SENSORES REMOTOS 1989, Bariloche. **Anais...** Bariloche Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.19.00.31.59/doc/INPE_4974.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2020.

FERNANDES, M. do C.; MENEZES, P. M. L. De. Comparação entre métodos para geração de MDE para a obtenção de observações em superfície real no maciço da Tijuca-RJ. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 57, n. 2, p. 154–161, 2005. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44954/23964>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

FERNANDES, N. F. Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios Modeling in Physical Geography: Theory, Potentialities and Challenges. **Espaço Aberto**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p. 209–247, 2016. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5793398>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

FERNANDES, R. R.; NUNES, G. M.; FANTIN-CRUZ, I.; SILVA, T. S. F.; CUNHA, C. N. da S. USO DE GEOTECNOLOGIAS NA ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE UNIDADES FITOFISIONÔMICAS NA REGIÃO DO MÉDIO ARAGUAIA. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 5, n. 65, p. 681–694, 2013. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43866>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Da. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 115–146, 2009. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/viewFile/3852/3156>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

FISHER, R. A. **Statistical Methods for Research Workers**. 1. ed. New York: HAFNER PUBLISHING COMPANY INC., 1954. Disponível em: <<http://93.174.95.29/main/888CF2410F20413D8B9D3375F5E39212>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

FONSECA, F. P. **A INFLEXIBILIDADE DO ESPAÇO CARTOGRÁFICO, UMA QUESTÃO PARA A GEOGRAFIA: análise das discussões sobre o papel da Cartografia**. 2004. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São Paulo, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-09082010-130954/publico/2004_FernandaPadivesiFonseca.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2020.

GERALDO, W. M. de J. **Novas Dinâmicas Socioespaciais Na “Cidade Alta” De Juiz De Fora - Mg**. 2011. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/latur/files/2011/07/Novas-Dinâmicas-Socioespaciais-na-Cidade-Alta-de-Juiz-de-Fora.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. do A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [s. l.], v. 30, n. 63, p. 231–244, 2010. Disponível em: <<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/148>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

GOMES, F. C. M.; CAMEZ, L. A. S.; ZAIDAN, R. T. CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DA KRIGAGEM PARA A GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO : UM ESTUDO DE CASO NO ALOS-PALSAR. In: VII SEMINÁRIO DO PPGeo-UFJF: A GEOGRAFIA E DO DESAFIOS CONTEMPORÂNEOS 2019, Juiz de Fora. **Anais... Juiz de Fora: VII Seminário do PPGeo-UFJF: A GEOGRAFIA E DO DESAFIOS CONTEMPORÂNEOS**, 2019. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/ppgeografia/files/2019/08/ANAIS-VII-SEMINÁRIO-DO-PPGeo.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

GREGORY, K. J. **A Natureza da Geografia Física**. 1. ed. Rio de Janeiro: EDITORA BERTRAND BRASIL S.A., 1992.

HARVEY, D. **Teorías, leyes y modelos en geografía**. 1. ed. Madri: Alianza Editorial, 1983.

HASMANN, D. dos S.; CAMARGO, D. C. De; ORENHA-OTTAIANO, A. Investigando a tradução de acrônimos e siglas da área de sensoriamento remoto: uma proposta do ponto de vista fraseológico. **Caderno de Letras da UFF**, [s. l.], p. 25–47, 2014. Disponível em: <<http://www.cadernosdeletras.uff.br/index.php/cadernosdeletras/article/view/122>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

IBGE, I. B. de G. e E. **Serviço online para pós-processamento de dados GNSS - IBGE-PPP**. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 10 ago. 2020.

INCRA. **Manual Técnico de Georreferenciamento de Imóveis Rurais - 1ª Edição**. [s.l.] : INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA, 2013. Disponível em: <http://www2.fct.unesp.br/docentes/cart0/JoaoFernando/AgrimensuraLegal/manual_tecnico_de_posicionamento>

_1_edicao.pdf>. Acesso em: 21 maio. 2020.

IORIO, M. M.; LASTORIA, G.; MIOTO, C. L.; ALBREZ, A. E. Do; PARANHOS FILHOS, A. Avaliação De Modelos Digitais De Elevação Extraídos De Imagem Alos/Prism E Comparação Com Os Modelos Disponibilizados Gratuitamente Na Web. **Geociências**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 650–664, 2012. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7222>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS 2006, Caxambu. **Anais...** Caxambu: XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, 2006. Disponível em: <<http://www.nepo.unicamp.br/vulnerabilidade/admin/uploads/producoes/MétodosInterpolação.PDF>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

JAXA, J. A. E. A. **ALOS Data Users Handbook**. [s.l.] : Japan Aerospace Exploration Agency, 2008. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS_HB_RevC_EN.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2020.

JEULIN, D. Obituary: Georges Matheron. **Advances in Applied Probability**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 1190–1192, 2000. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/journals/advances-in-applied-probability/article/obituary-georges-matheron/E20F15E902E1F35B610507A189B91C17>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

JOHNSON, S. **O mapa fantasma: como a luta de dois homens contra o cólera mudou o destino de nossas metrópoles**. 1. ed. Rio de Janeiro: Zahar, 2008. Disponível em: <<https://libgen.pw/item?id=1544722&adblock=true>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

KOCH, T. Cholera, Chloroform, and the Science of Medicine: A Life of John Snow. **Cartographic Perspectives**, [s. l.], n. 48, 2004.

KUHN, T. S. **A Estrutura das revoluções científicas**. 5. ed. São Paulo: Perspectiva S.A, 2017.

LANDIM, P. M. B. Sobre Geoestatística e mapas. **Terrae Didactica**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 19, 2006. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/article/view/8637463>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital terrain modeling: Principles and methodology**. [s.l.] : CRC Press, 2004. Disponível em: <<https://b-ok.cc/book/437408/e54e85>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

LOPES, C. E.; MEIRELLES, E. O Desenvolvimento da Probabilidade e da Estatística. In: MATHEMATICS TEACHING 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: XVIII ENCONTRO REGIONAL DE PROFESSORES DE MATEMÁTICA, 2005. Disponível em: <https://www.ime.unicamp.br/erpm2005/anais/m_cur/mc02_b.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2020.

MACIEL, A. de O. Aplicações: Mapeamento Móvel utilizando tecnologia LIDAR. In: ANAIS XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2011. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.18.14.18/doc/p0946.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

MAGRI, E. Memories of Danie Krige. **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, Joanesburgo, p. 2, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532014000800005>. Acesso em: 7 abr. 2020.

MARION, F. A.; DOS SANTOS, E. B.; HENDGES, E. R. ANÁLISE DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA MODELAGEM DO RELEVO NO MUNICÍPIO DE FRANCISCO BELTRÃO – PR. **REVISTA GEOGRÁFICA ACADÊMICA**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 50–60, 2015. Disponível em: <<http://revista.ufr.br/index.php/rga/article/view/3035>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

MATHERON, G. Principles Of Geostatistics. **Economic Geology**, [s. l.], v. 58, p. 1246–1266, 1963. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/economicgeology/article-abstract/58/8/1246/17275/Principles-of-geostatistics?redirectedFrom=PDF>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

MATHERON, G. Advanced Geostatistics in the Mining Industry. In: GUARASCIO, M.; DAVID, M.; HUIJBREGTS, C. (Eds.). **International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique**. 1. ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 1976. v. 47p. 89.

- MATOS, A. **Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul**. 2005. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [s. l.], 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-10102005-104155/en.php>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- MCCORMICK, T. William Petty: And the Ambitions of Political Arithmetic. **William Petty: And the Ambitions of Political Arithmetic**, New York, p. 1–368, 2009. Disponível em: <<http://93.174.95.29/main/F9CD1D20F5F93F7777297C90748ECFB3>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- MCMMASTER, R. In Memoriam: George F. Jenks (1916-1996). **Cartography and Geographic Information Systems**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 56–59, 1997. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1559/152304097782438764>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- MEMÓRIA, J. M. P. **Breve História da Estatística**. 1. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. v. 2 Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/110361/breve-historia-da-estatistica>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- MICELI, B. S.; DIAS, F. D. M.; SEABRA, F. M.; SANTOS, P. R. A. Dos; FERNANDES, M. do C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 63, n. 1, p. 191–201, 2011. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43731/22995>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- MILARÉ, G.; SILVA, N. M.; PARANHOS FILHO, A. C. Scenario the Use of Free Software in Geographic Information Systems (GIS) in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 111, 2016. Disponível em: <http://www.anuario.igeo.ufrj.br/2016_3/2016_3_111_115.pdf>
- MINNITT, R. C. A.; ASSIBEY-BONSU, W. Professor D.G. Krige FRSSAf. **Transactions of the Royal Society of South Africa**, [s. l.], v. 68, n. 3, p. 199–202, 2013. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0035919X.2013.826748>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- MIRANDA, G. H. B. **Análise De Amostragem E Interpolação Na Geração**. 2017. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/10840/texto_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- MIRANDA, G.; MEDEIROS, N.; DOS SANTOS, A.; DOS SANTOS, G. Análise de Qualidade de Amostragem e Interpolação na Geração de MDE. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 70, n. 1, p. 226–257, 2018. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/download/45255/24141/>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- MOLER, C. **The Origins of MATLAB**. 2004. Disponível em: <<https://la.mathworks.com/company/newsletters/articles/the-origins-of-matlab.html>>. Acesso em: 28 mar. 2020.
- MOLER, C. **A Brief History of MATLAB**. 2018. Disponível em: <<https://la.mathworks.com/company/newsletters/articles/a-brief-history-of-matlab.html>>. Acesso em: 28 mar. 2020.
- MOURA, A. B. A. P. de B. A. P. de M. **ANÁLISE AMBIENTAL DO CONFLITO DE USO E COBERTURA DA TERRA EM ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE NA REGIÃO ADMINISTRATIVA OESTE DE JUIZ DE FORA - MG**. 2017. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/6094>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- MOURA, A. C. M. APLICAÇÃO DO MODELO DE POLÍGONOS DE VORONOI EM ESTUDOS DE ÁREAS DE INFLUÊNCIA DE ESCOLAS PÚBLICAS: ESTUDO DE CASO EM OURO PRETO – MG. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 25, 2009. Disponível em: <<https://www.revistaaber.org.br/rberu/article/download/55/43>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- NAISSINGER, B. M.; THUM, A. B. **NOTAS SOBRE COMPARAÇÕES ENTRE DISTINTOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO**. 2017. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Sao Leopoldo, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/6585/Bruna_Mendel_Naissinger_.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- NASCENTES, A. **Dicionário Etimológico da Língua Portuguesa**. 1. ed. Rio de Janeiro. v. 2 Disponível em: <<https://www.docdroid.net/8C7Raqt/dicionario-etimolgico-da-lingua-portuguesa-text.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

- NASCIMENTO, T. P. Do. **O Uso do SSIM Como Critério de Convergência em Abordagens Bayesianas Variacionais de Superresolução Multiframe**. 2015. Universidade Federal do Espírito Santo, [s. l.], 2015. Disponível em: <<http://repositorio.ufes.br/handle/10/9659>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- NASSER, H. **ArcGIS By Example**. 1. ed. Birmingham: Packt Publishing Ltd., 2015. Disponível em: <<https://book.cc/book/5151934/0d1f1f>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- NEUMAN, G.; SILVEIRA, C. T. Da; SAMPAIO, T. V. M. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESCALA NA OBTENÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS DERIVADOS DE MDE. **RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, [s. l.], v. 43, p. 179–199, 2018. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/56278>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- OLIVEIRA, E. D. De. **SIMULAÇÕES DA TEMPERATURA DO AR NA SUPERFÍCIE BASEADAS NOS EFEITOS DO FLUXO DE RAIOS CÓSMICOS GALÁCTICOS SOBRE O BALANÇO RADIATIVO GLOBAL**. 2019. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/27210>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- QUINA, R. R. **AVALIAÇÃO DO MDE GERADO PELO SENSOR PALSAR/SATÉLITE ALOS, COMO ALTERNATIVA PARA O ZONEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO A ESCORREGAMENTOS EM LOCAIS COM DEFICIÊNCIA DE DADOS**. 2019. Universidade Federal de Juiz de Fora, [s. l.], 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/10266>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- QUINA, R. R.; COSTA, R. M.; ZAIDAN, R. T. MAPEAMENTO DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS COM O MODELO SINMAP, A PARTIR DA COMPARAÇÃO DOS SENSORES LIDAR E ALOS PALSAR : UMA APLICAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO TAPERA , JUIZ DE FORA-MG. In: XII SINAGEO - PAISAGEM E GEODIVERSIDADE 2018, Crato. **Anais...** Crato: XII SINAGEO - Paisagem e Geodiversidade, 2018. Disponível em: <<http://www.sinageo.org.br/2018/trabalhos/9/9-220-1936.html>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- RAMANI, R. V. **Memorial Tributes Volume 19**. 1. ed. Washington, D.C.: National Academies Press, 2015. v. 19 Disponível em: <<http://www.nap.edu/catalog/21785>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- REFICE, A.; GIACHETTA, E.; CAPOLONGO, D. SIGNUM: A Matlab, TIN-based landscape evolution model. **Computers and Geosciences**, [s. l.], v. 45, p. 293–303, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2011.11.013>>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- ROCHA, C. H. B. **Geomática na prática**. 1. ed. São Paulo: Editora CRV, 2019. Disponível em: <<https://editoracrv.com.br/produtos/detalhes/33810-crv>>
- ROCHA, C. H. B.; VASCONCELOS, D.; SOUZA, L. V; SILVEIRA, F. J.; ALMEIDA, L. L. Comparação de Modelos Digitais de Elevação Obtidos a Partir de Diferentes Bases De Dados - Curvas De Nível e Pontos Cotados IBGE, Lidar, SRTM e Alos. In: ANAIS DO XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA E XXVI EXPOSICARTA 2017, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositocarta, 2017. Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/cbc/2017/trabalhos/6/fullpaper/CT06-69_1506648781.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- ROCHA, M. A.; SALVI, R. F. Repensando a Tipologia De Modelos Em Geografia. **Geografia Ensino e Pesquisa**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 146, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/24484/pdf_1>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- RODRIGUES, F. Geoprocessamento: dez anos de transformações. Curitiba (PR), n. October, p. 17–24, 2001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Clodoveu_Davis_Jr/publication/228952628_Geoprocessamento_dez_anos_de_transformacoes/links/57f3ac4508ae280dd0b72550.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2020.
- SANTOS, G. R. Dos. **HIERARQUIZAÇÃO GEOMÉTRICA DOS PREDITORES GEOESTATÍSTICOS**. 2010. Universidade Federal de Lavras, [s. l.], 2010. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/handle/1/4304>>
- SANTOS, M. S. T.; SILVA, E. B. S.; SOUZA, A. M.; TEIXEIRA, W. L. E.; SCHMIDT, A. C. P. de S.; FRANCELINO, A. V. M.; SABADIA, J. A. B.; FRANCISCO PINHEIRO LIMA FILHO. Geração e análise estatística de Modelo Digital de Elevação (MDE) com dados de GPS em tempo rela (GPS/RTK). **Estudos Geológicos**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 94–110, 2008. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/35155550-Geracao-e-analise-estatistica-de-modelo-digital-de-elevacao-mde-com-dados-de-gps-em-tempo-real-gps-rtk.html>>. Acesso

em: 7 abr. 2020.

SANTOS, P. F.; DIAS, A. M.; COSENZA, A.; FONSECA, J. A.; SILVA, M. A. Impactos e Injustiças Ambientais: Significações de Atores que Constituem um Conflito Socioambiental. **Pesquisa em Educação Ambiental**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 100–114, 2017. Disponível em: <<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/pesquisa/article/view/11085>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

SANTOS, R. H. G. **GNSS APLICADO AO LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE EMPREENHIMENTO AQUÍCOLA**. 2017. Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/178523/TCC - Robert Henrique Gonçalves.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 21 maio. 2020.

SEIFE, C. **Os Números (Não) Metem: como a Matemática Pode Ser Usada Para Enganar Você**. 1. ed. [s.l.] : Zahar, 2012. Disponível em: <<https://b-ok.cc/book/2543659/8b0fc1>>. Acesso em: 17 abr. 2020.

SILVA, A. de B. **Sistemas de informações Geo-referenciadas**. São Paulo: Editora Unicamp, 2003.

SILVA, C. R. P.; DEMARQUI, E. N.; ALMEIDA, F. T.; MINGOTI, R.; SOUZA, A. P. Diferentes modelos digitais de elevação na caracterização física da bacia hidrográfica do Rio Nandico, MT, Brasil. **Scientia Plena**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 1–11, 2015. Disponível em: <<https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/1987/1217>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

SILVA, A. de Q. Da. **Conceitos básicos de radar interferometria**. 1. ed. Pará: Universidade Federal do Pará - Assessoria de Educação a Distância, 2013. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/72567709/09-conceitos-basicos-de-radar-interferometria>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

SILVA, L. R. Da. **Do Senso - Comum À Geografia Científica**. 2. ed. São Paulo: Contexto, 2004.

TAVARES, M. **Estatística Aplicada à Administração**. 1. ed. Brasília: Secretaria de Educação à Distância do Ministério da Educação Sistema Universidade Aberta do Brasil-UAB. Diretoria do Departamento de Políticas em Educação a Distância-DPEAD, 2007. Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/LIVROS/LIVROS/Marcelo_Tavares_2007_Sistema_Universidade_Aberta_do_Brasil.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2020.

TESKE, R.; GIASSON, E.; BAGATINI, T. Comparação do uso de modelos digitais de elevação em mapeamento digital de solos em Dois Irmãos, RS, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 38, n. 5, p. 1367–1376, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v38n5/a02v38n5.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

TOMLINSON, R. F. The impact of the transition from analogue to digital cartographic representation. **American Cartographer**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 249–262, 1988. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1559/152304088783886937>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

TONINI, A. M.; SCHETTINO, D. N. **MATLAB para Engenharia**. 1. ed. Belo Horizonte: Curso de Engenharia de Telecomunicações, 2002. Disponível em: <http://www.ime.unicamp.br/~carla/MS211-CN/ApostilaMatLab_UNI.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2020.

TORLAY, R.; VICTORIA, D. D. C.; TADATOMO, O. COMPARAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA A ILHA DE SÃO SEBASTIÃO - SP. In: 2011, Campinas. **Anais...** Campinas Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/53064/1/RE11503.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

TRINDADE, P. M. P. **ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA EM SANTA MARIA – RS A PARTIR DE IMAGENS TERMAIS LANDSAT 8 E EXPERIMENTO DE CAMPO**. 2018. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [s. l.], 2018. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/189386>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

VALERIANO, M. D. M. **Topodata : Guia Para Utilização De Dados Geomorfológicos Locais**. 2008. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

VALERIANO, M. D. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Topodata : Processamento Dos Dados Srtm. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**, São José dos Campos, p. 79, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.42>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

VALERIANO, M. de M.; ROSSETTI, D. D. F. Topodata: Seleção De Coeficientes Geoestatísticos Para O Refinamento Unificado De Dados Srtm. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)**, São José dos Campos, p. 74, 2010. Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.35/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

VARSAVSKY, A.; MAREELS, I.; COOK, M. **Epileptic seizures and the EEG: Measurement, models, detection and prediction**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. Disponível em: <<https://libgen.pw/item?id=1027495&adblock=true>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

VIANA, D. C. **ANÁLISE DA QUALIDADE CARTOGRÁFICA DE MDS E MDE GERADOS POR VANT E REFINADOS COM USO DE DADOS GNSS RTK**. 2017. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/19991/texto_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 7 abr. 2020.

VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D. Modelos em geografia física: conceitos e aplicações na previsão de escorregamentos. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 194, 2016. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/102616/112924>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

WASSER, L.; GOULDE, T. **Going On The Grid -- An Intro to Gridding & Spatial Interpolation**. 2020. Disponível em: <<https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/spatial-interpolation-basics>>. Acesso em: 3 mar. 2021.

XAVIER-DA-SILVA, J. A pesquisa ambiental no Brasil: uma visão crítica. In: CHRISTOFOLETII, A.; BECKER, B. K.; VIDOVICH, F. R. DA; GEIGER, P. P. (Eds.). **GEOGRAFIA E MEIO AMBIENTE NO BRASIL**. 1. ed. São Paulo: HUCITEC, 1995. p. 395.

XAVIER-DA-SILVA, J. **Geoprocessamento para Análise Ambiental**. 1. ed. Rio de Janeiro: S.n, 2001.

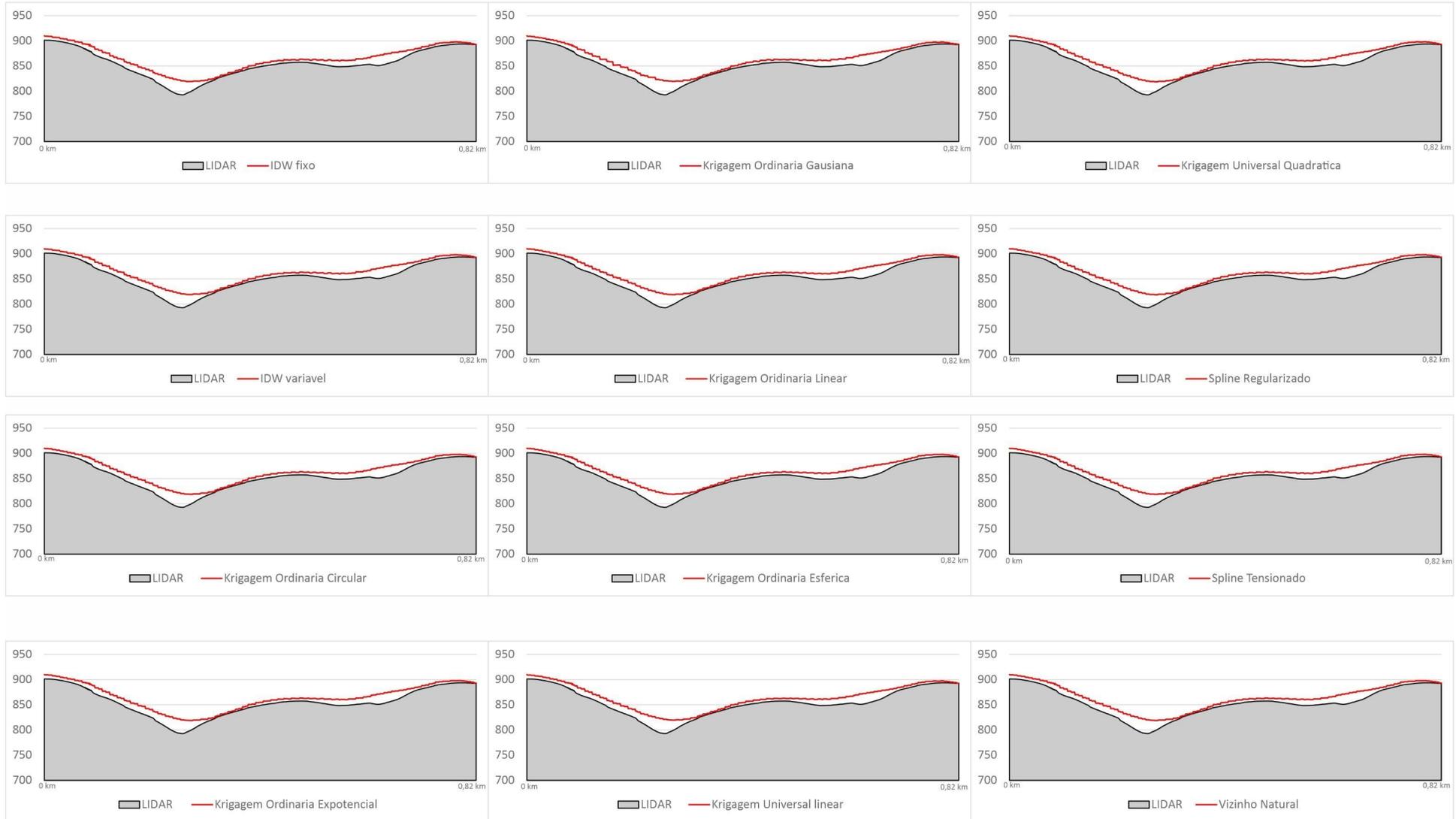
YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2013.

ZAIDAN, R. T. Geoprocessamento Conceitos E Definições. **Revista de Geografia - PPGeo - UFJF**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 7, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.ufjf.br/index.php/geografia/article/view/18073>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

ZANIN, P. R.; BONUMÁ, N. B.; PAOLO, J.; MINELLA, G. DETERMINAÇÃO DO FATOR TOPOGRÁFICO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DETERMINATION THE TOPOGRAPHIC FACTOR IN WATERSHED. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [s. l.], v. 18, n. 1, 2017.

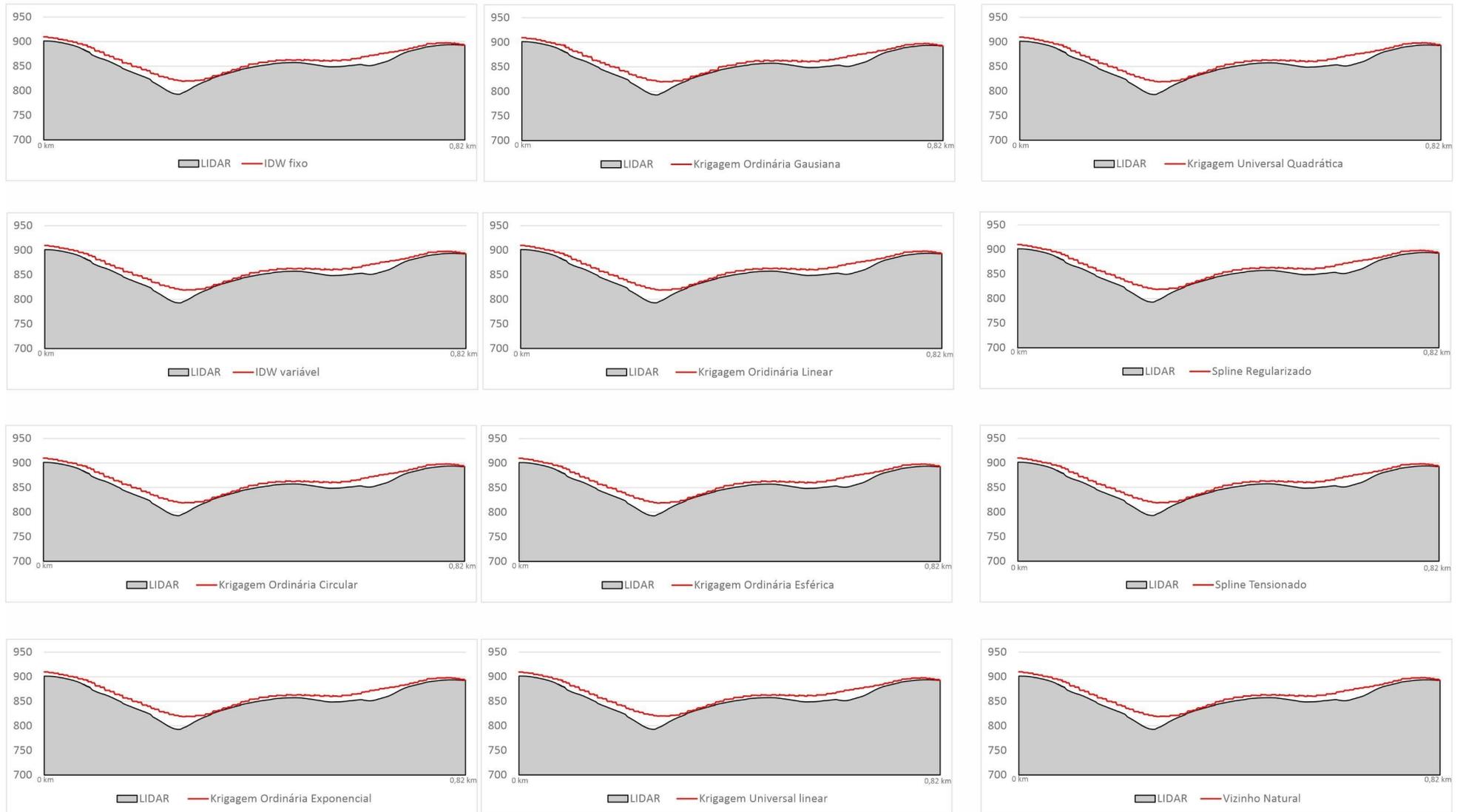
APÊNDICE A

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO PERFIL 1 DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 6m



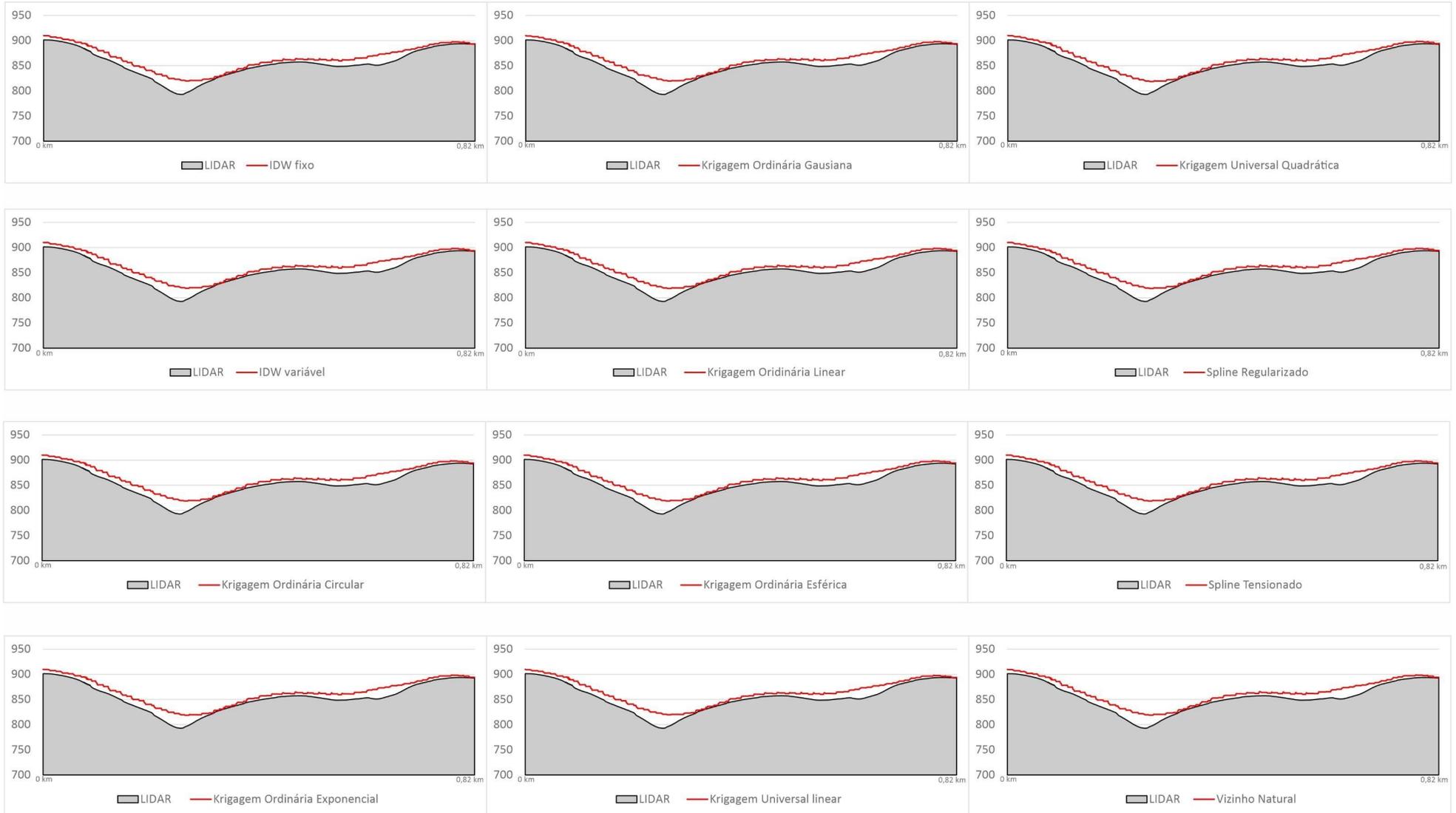
APÊNDICE B

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO DO PERFIL 1, DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 8m



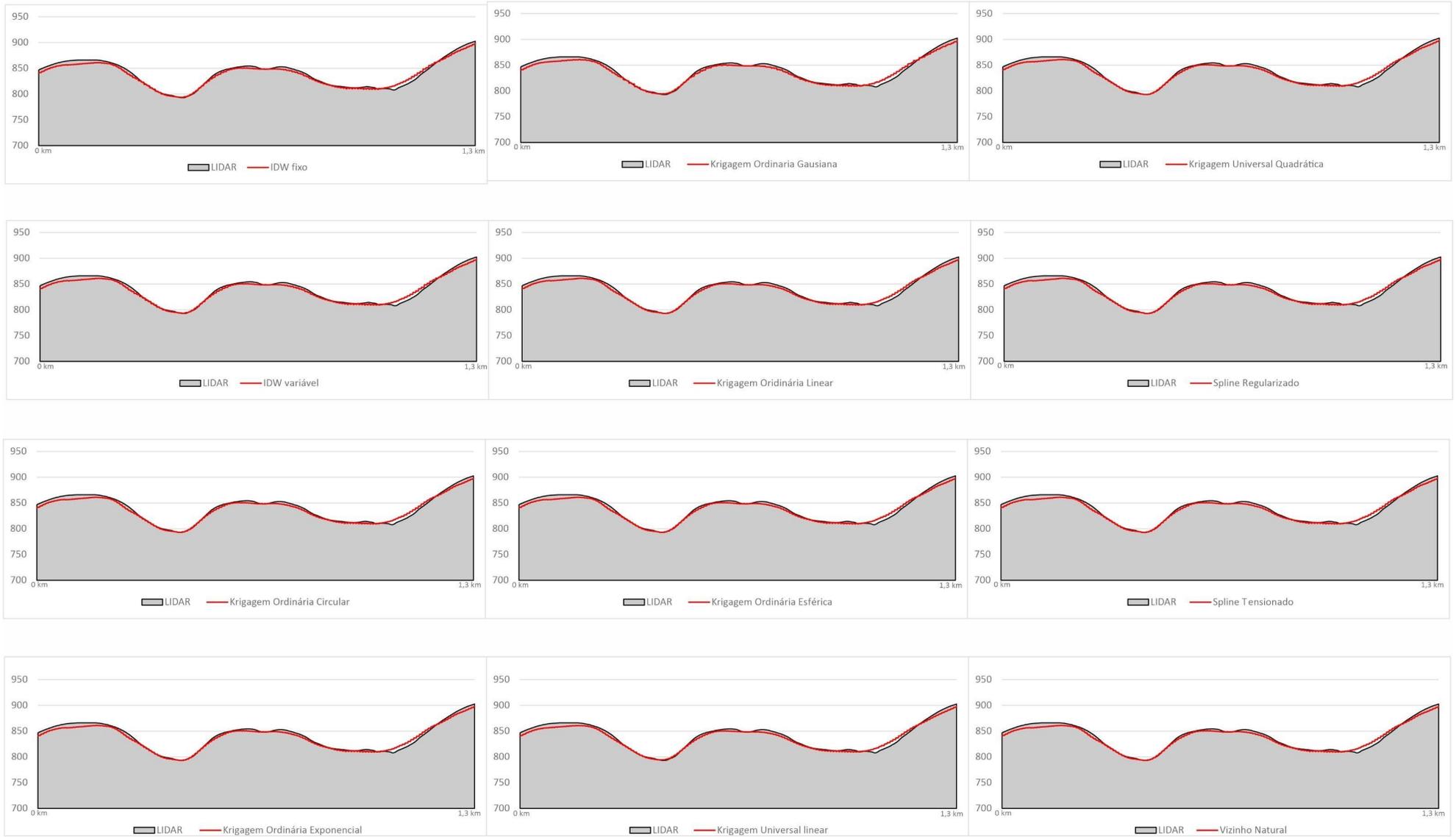
APÊNDICE C

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO DO PERFIL 1, DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 10m



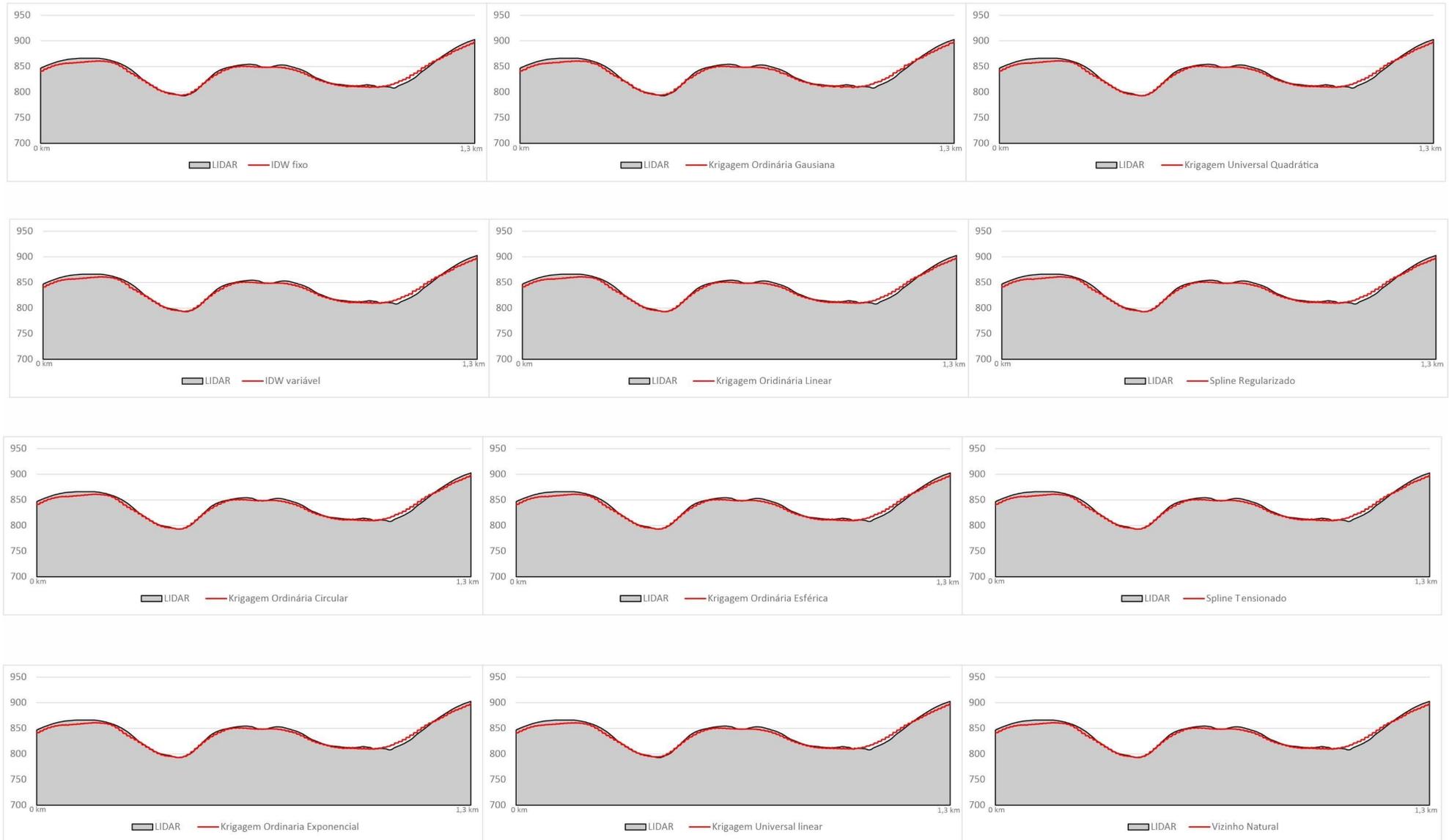
APÊNDICE D

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO DO PERFIL 2 ,DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 6m



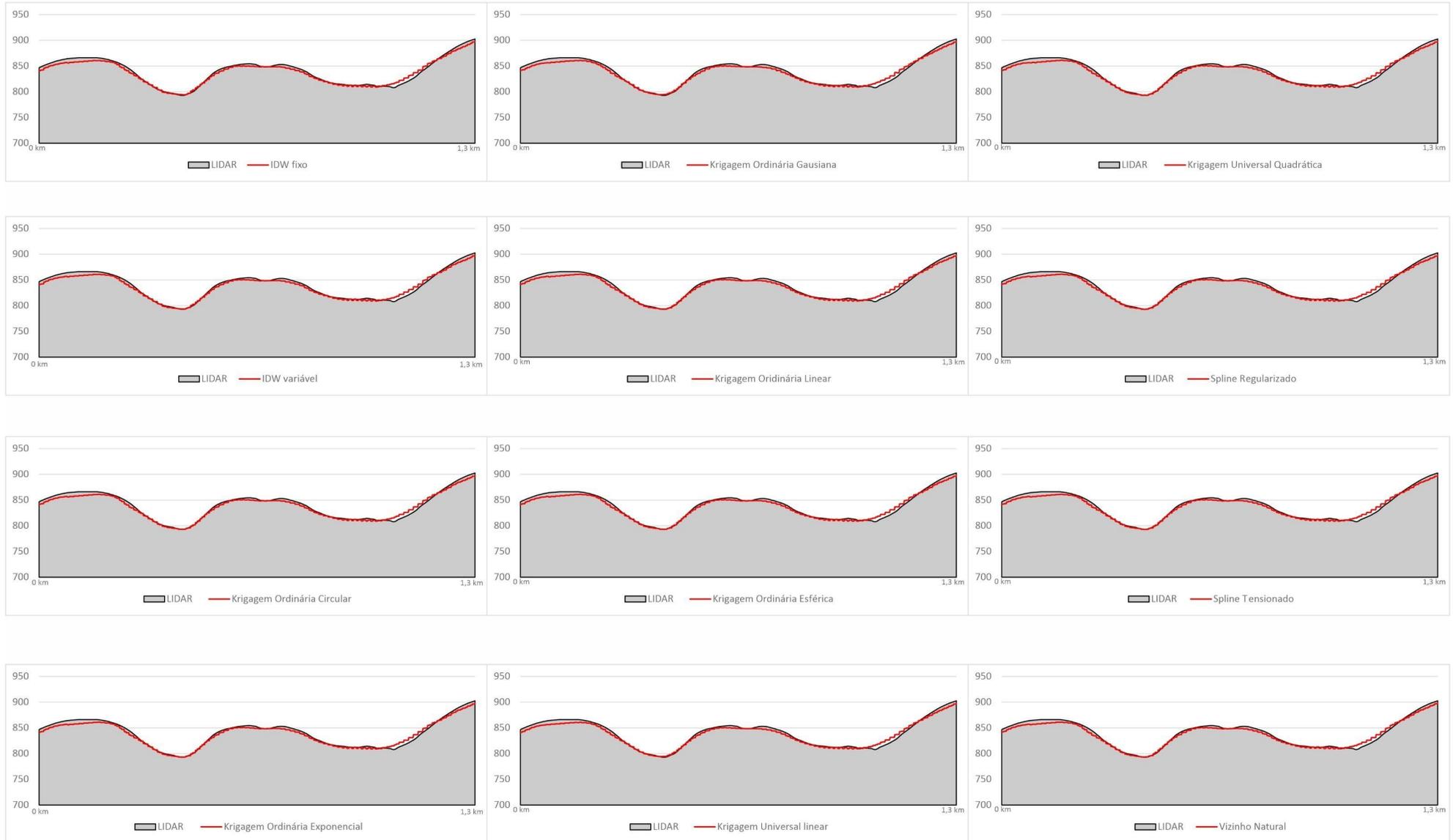
APÊNDICE E

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO DOPERFIL 2 DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 8m



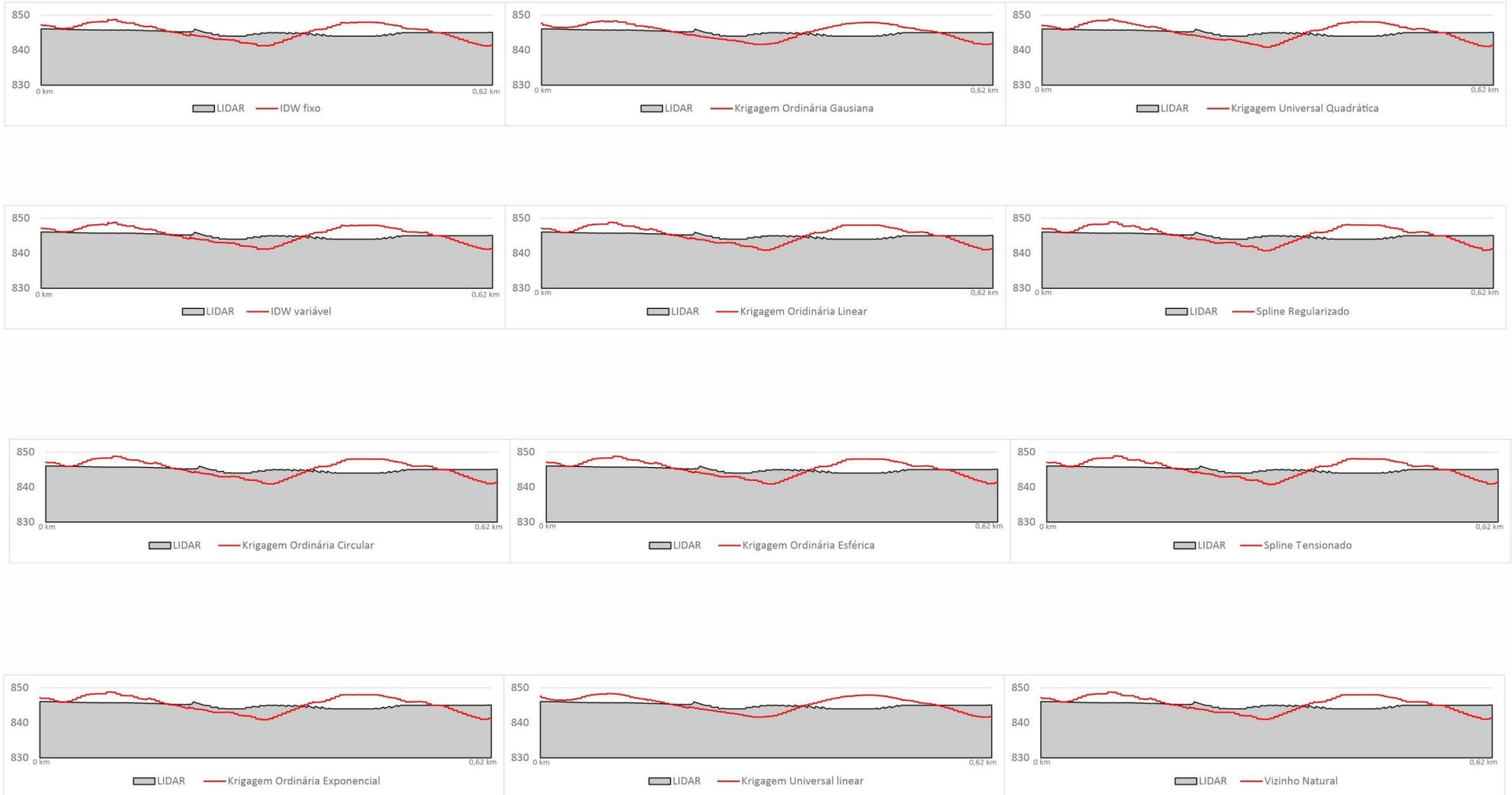
APÊNDICE F

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO DO PERFIL 2, DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 10m



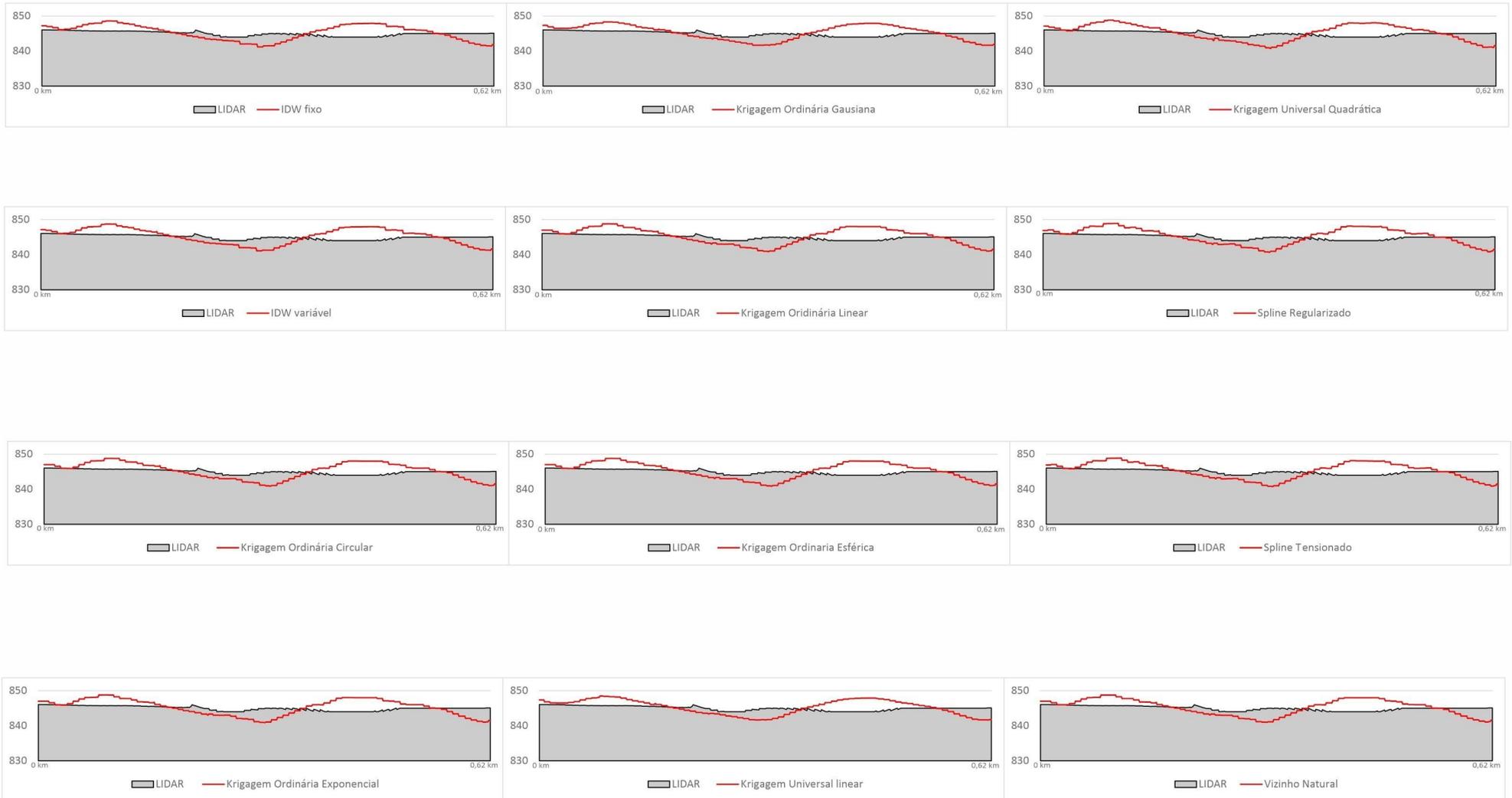
APÊNDICE G

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO DO PERFIL 3, DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 6m



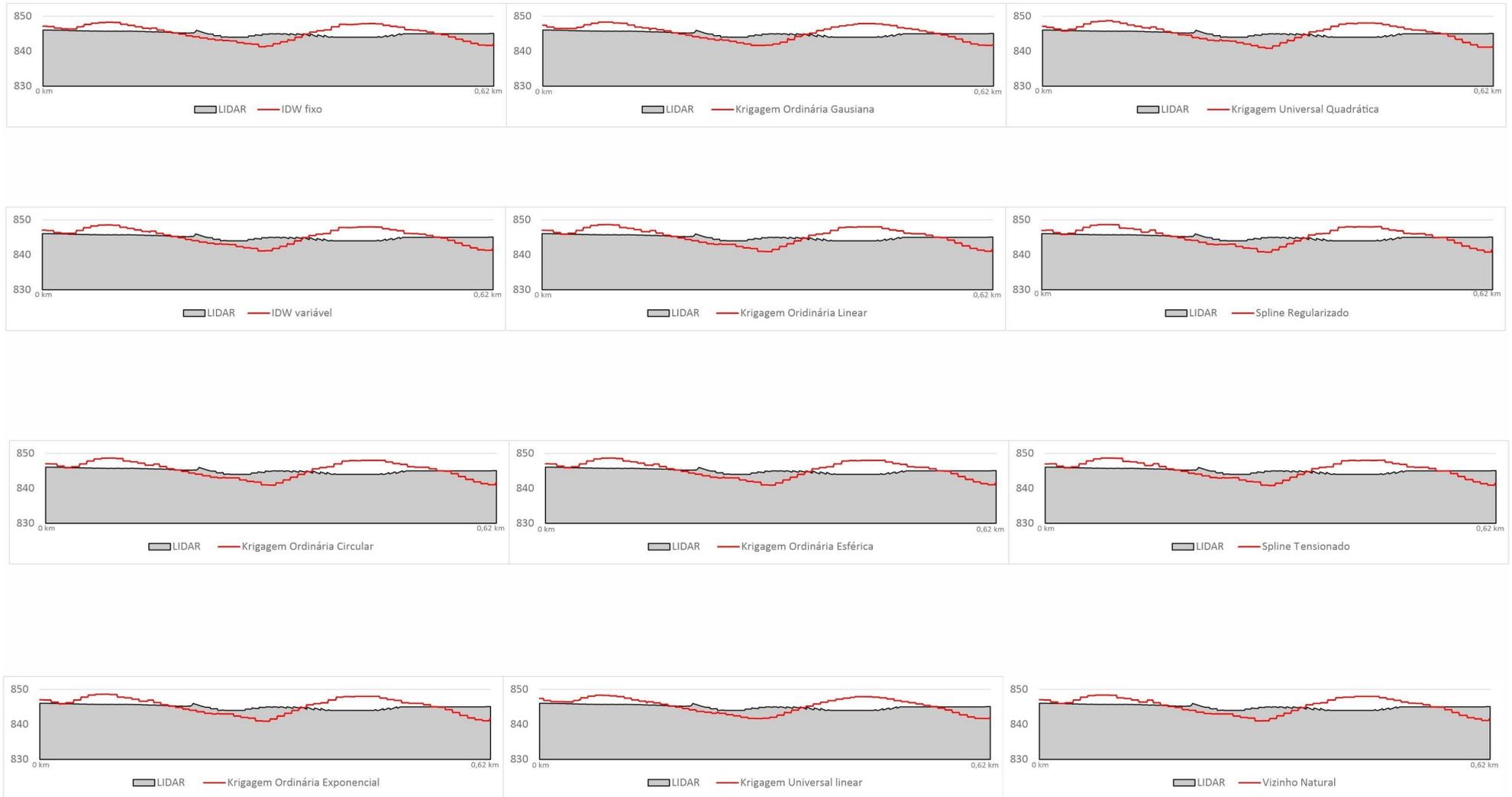
APÊNDICE H

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO DO PERFIL 3, DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 8m



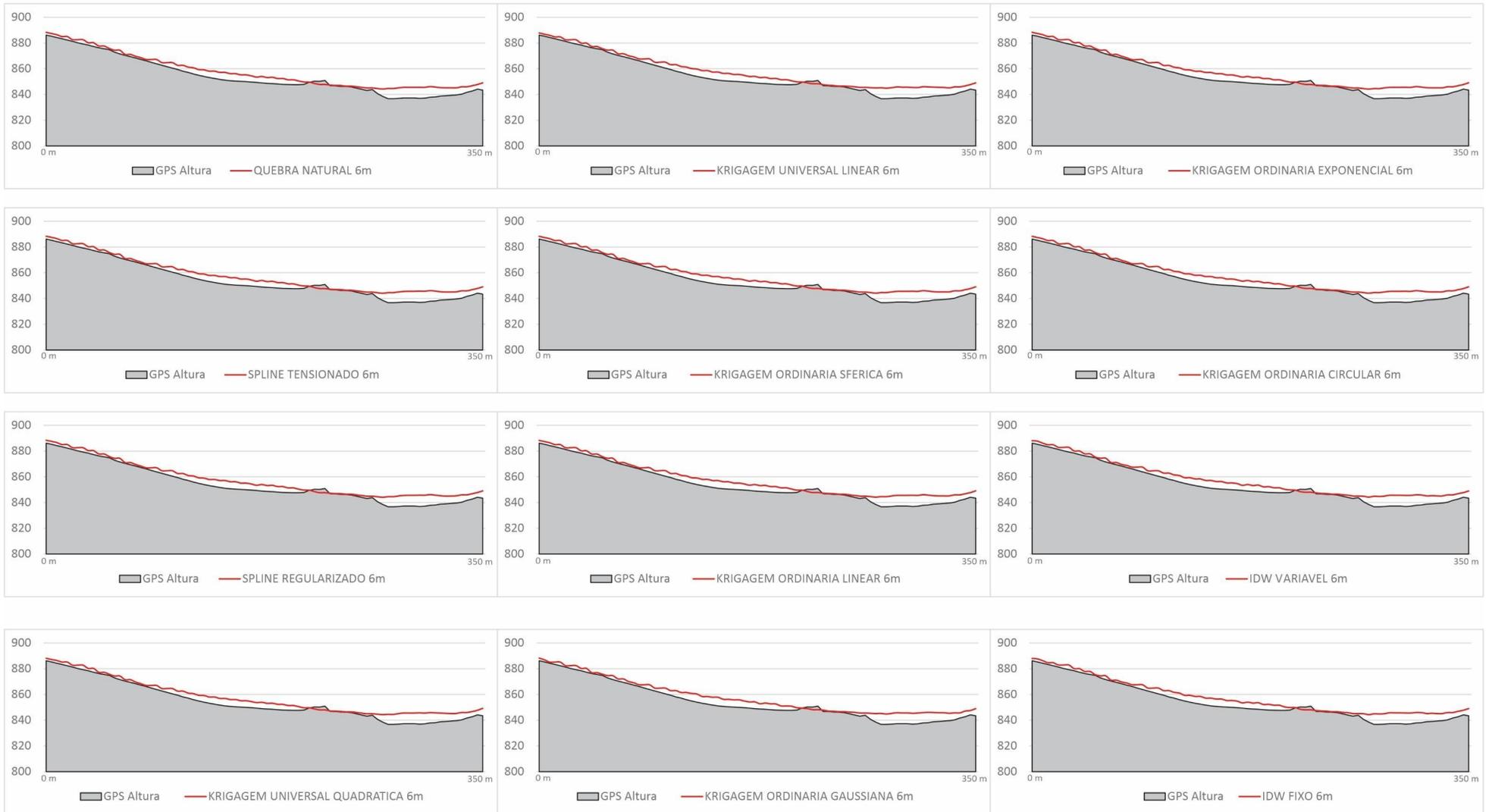
APÊNDICE I

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO DO PERFIL 3, DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 10m



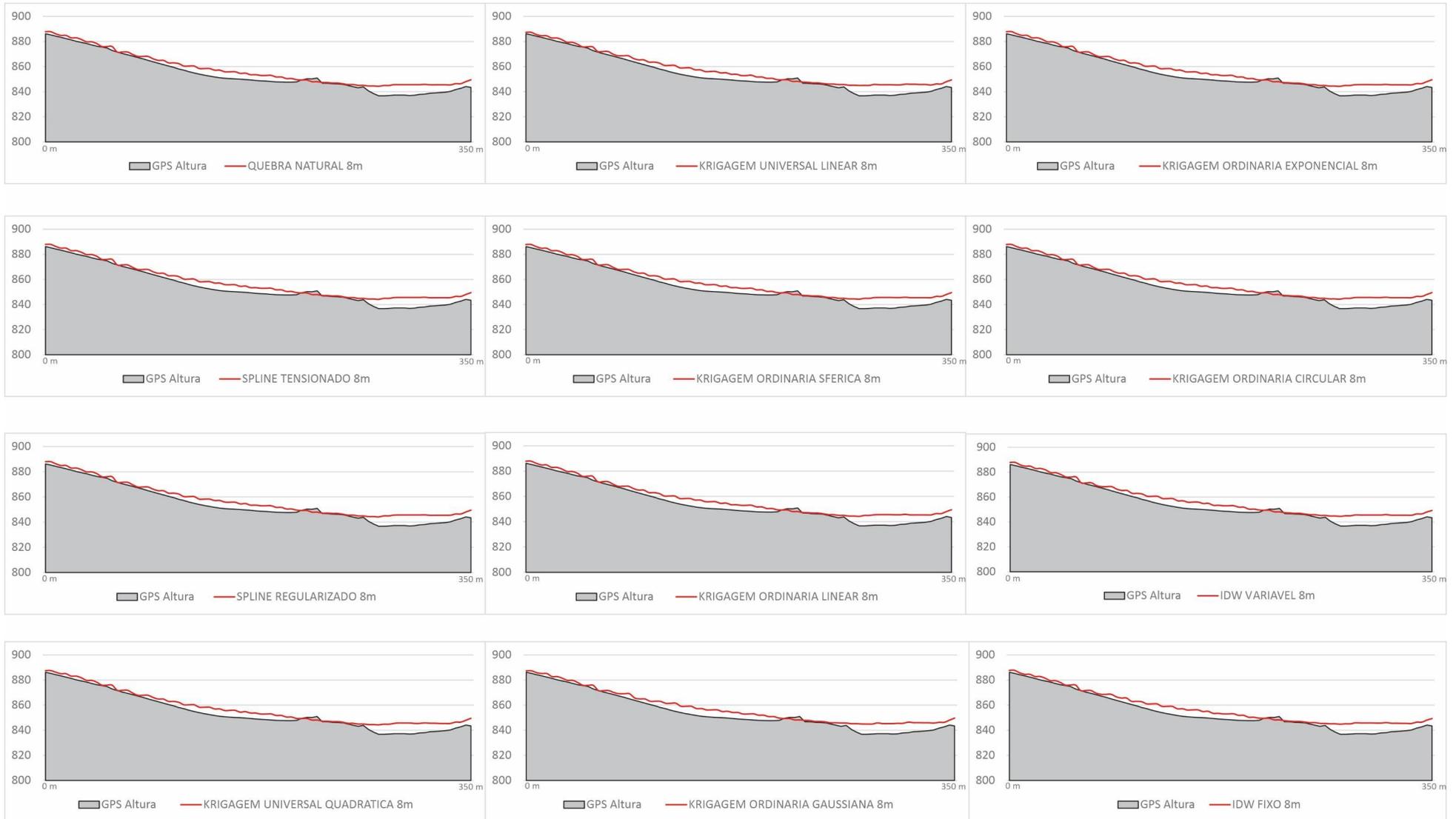
APÊNDICE J

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO PERFIL ALPHA VILE DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 6m



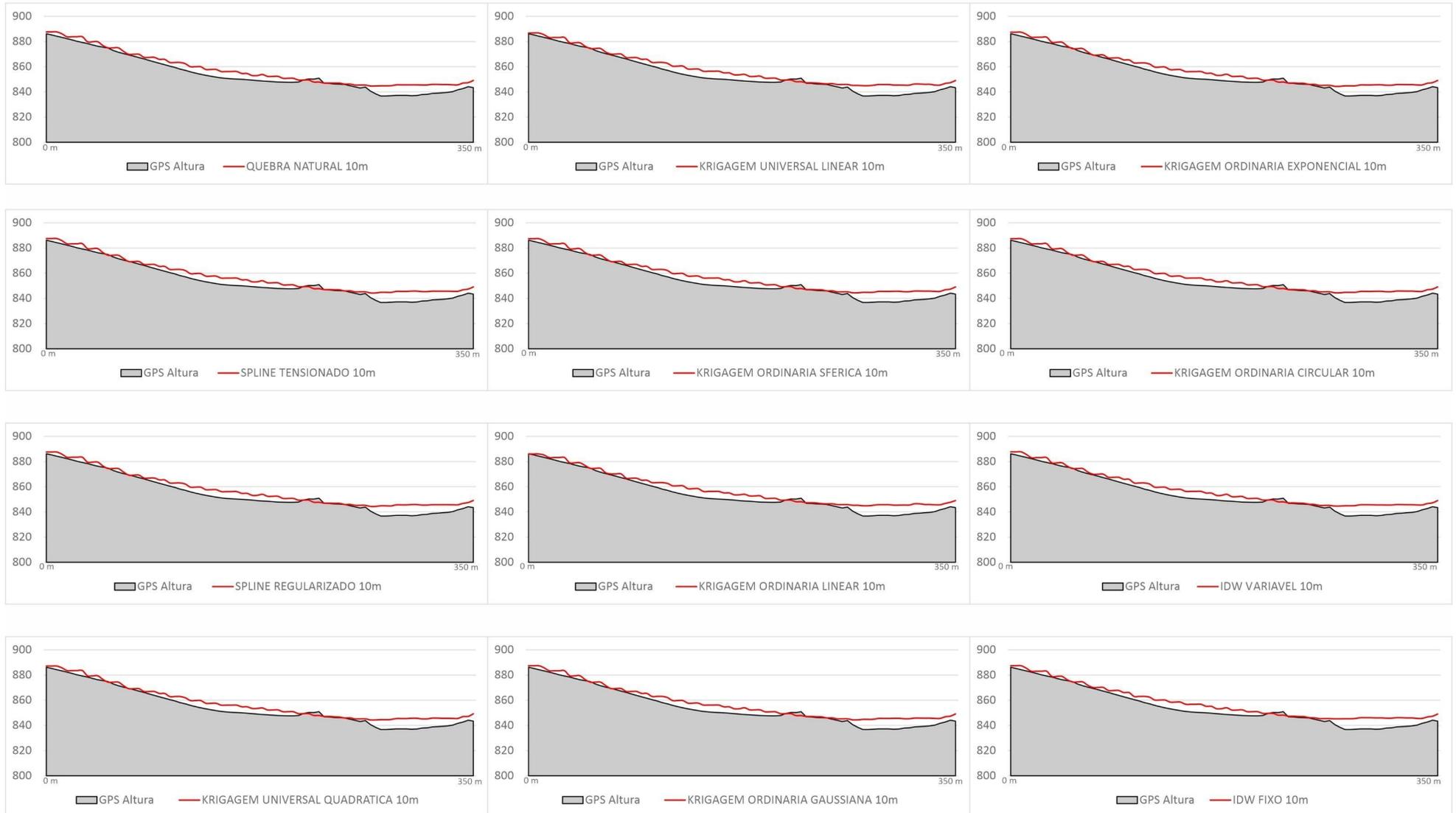
APÊNDICE K

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO PERFIL ALPHA VILE DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 8 m



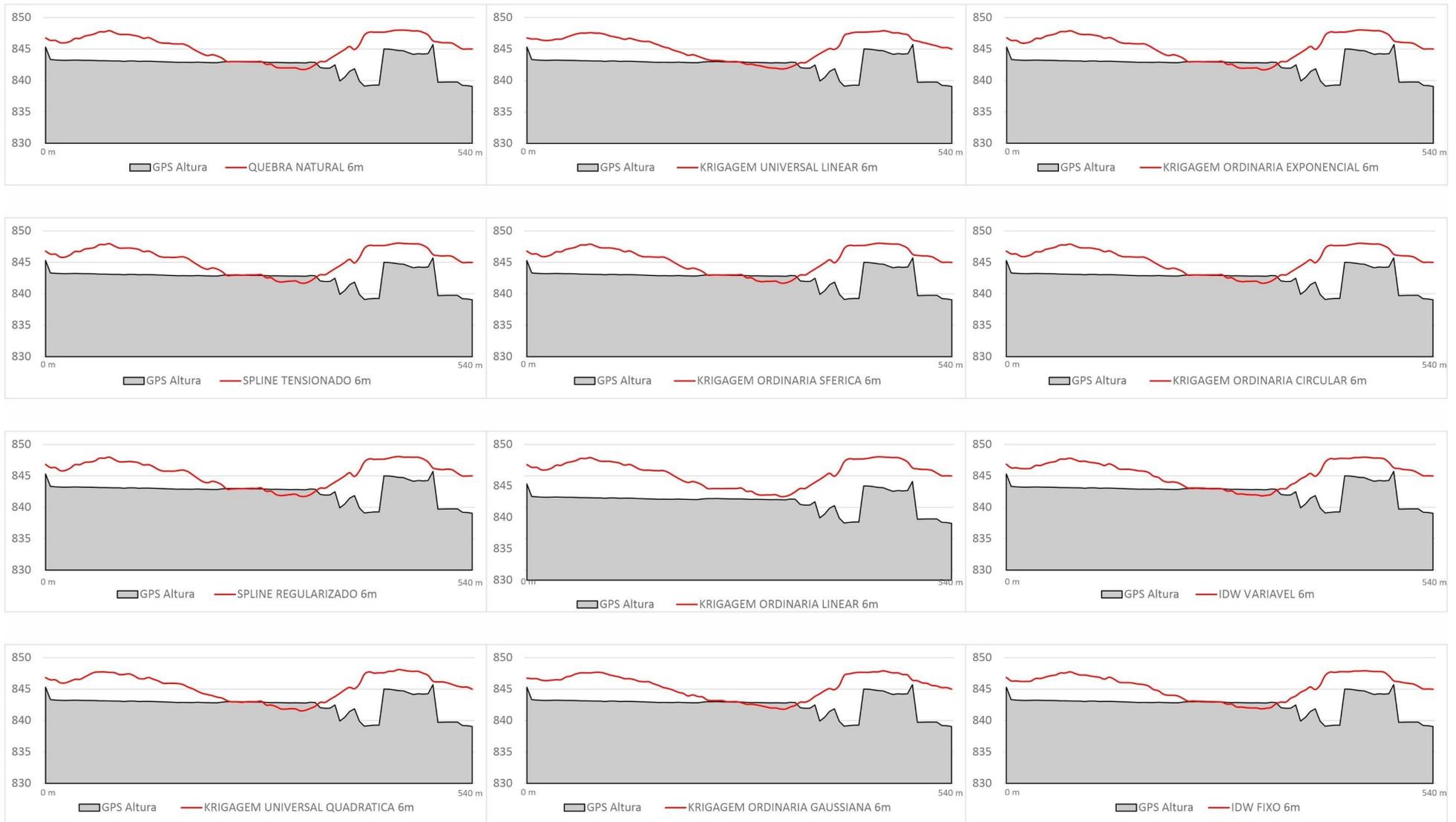
APÊNDICE L

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO PERFIL ALPHA VILE DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 10 m



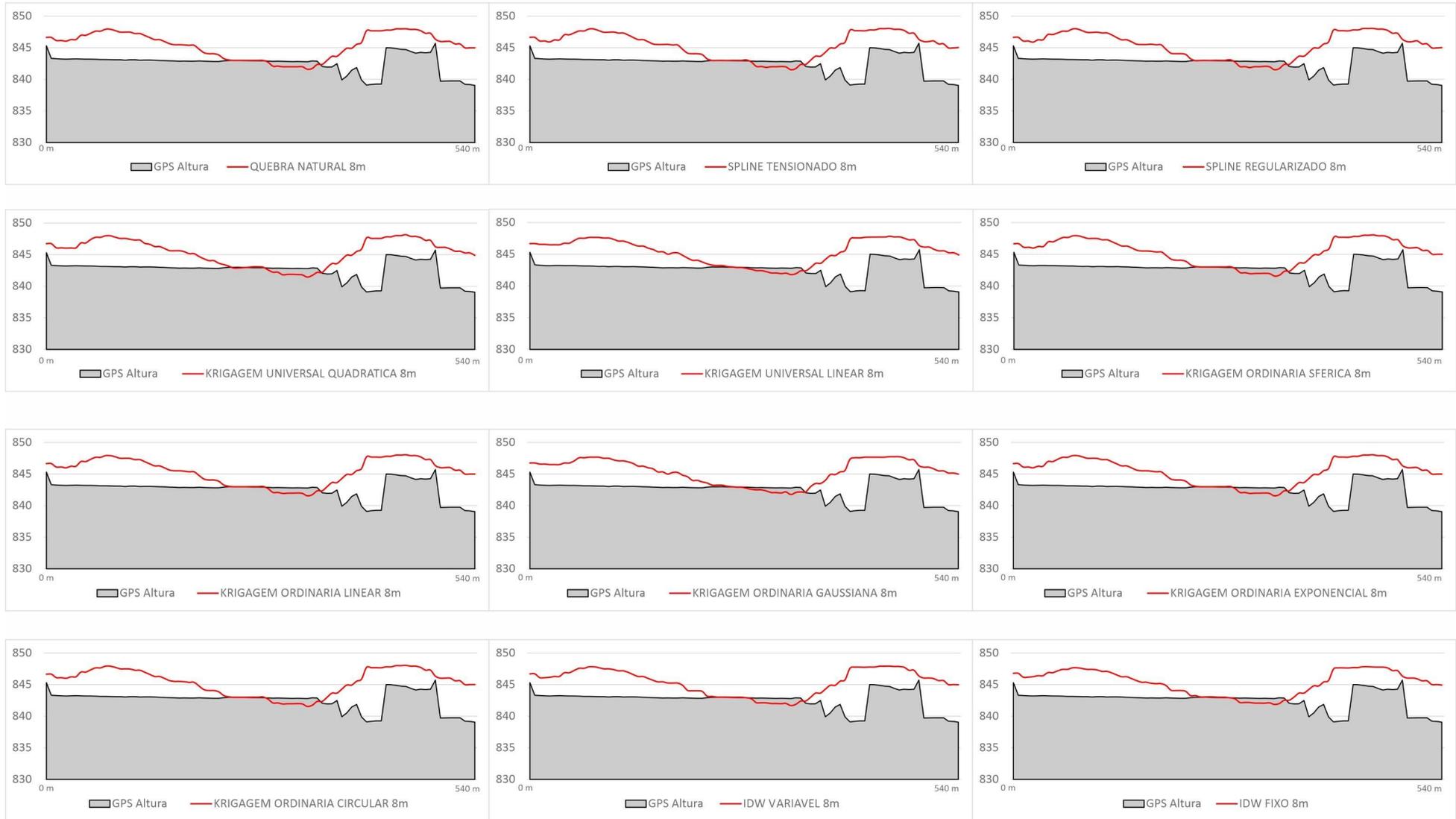
APÊNDICE M

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO PERFIL BR 440 DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 6 m



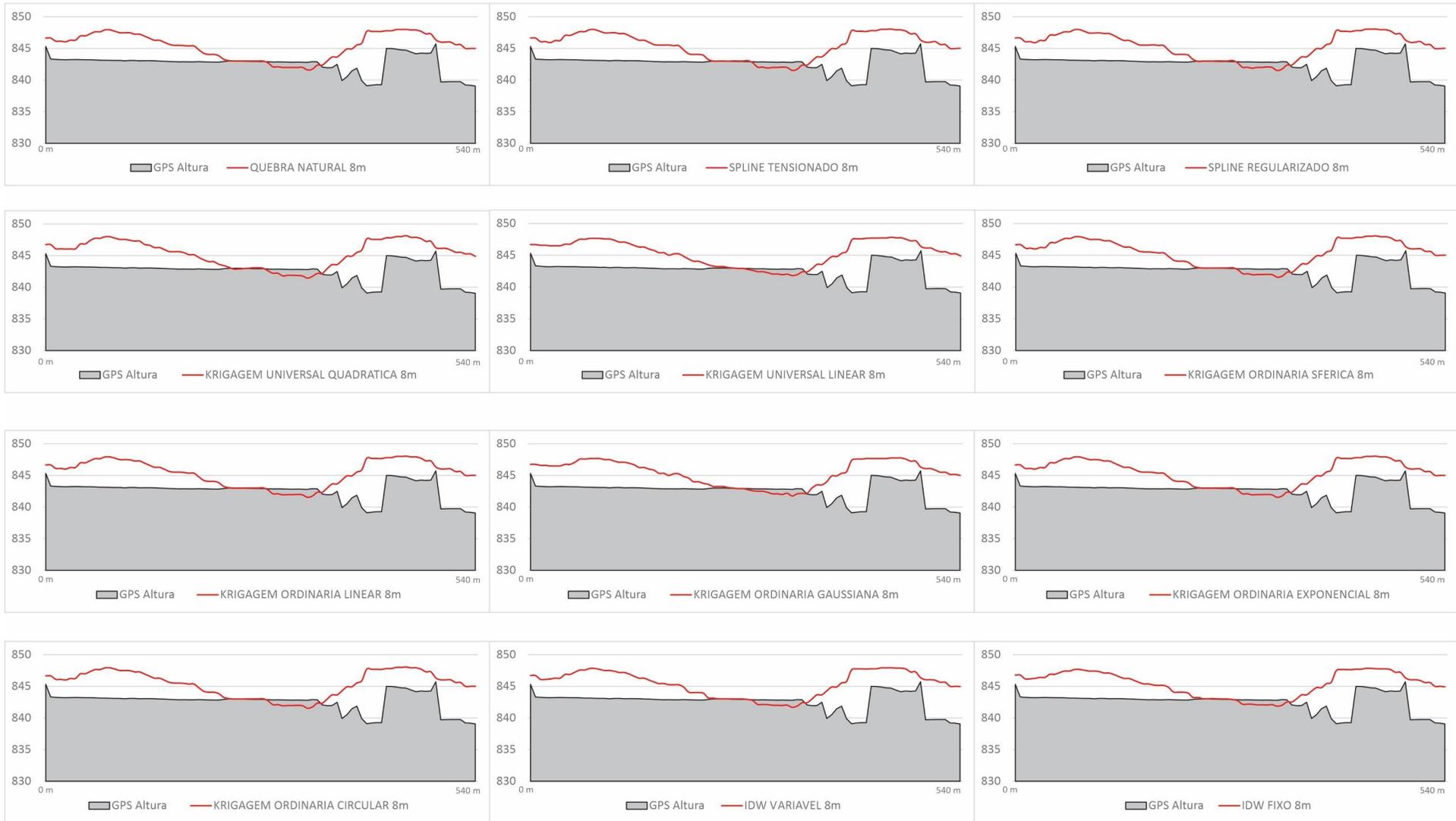
APÊNDICE N

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO PERFIL BR 440 DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 8 m



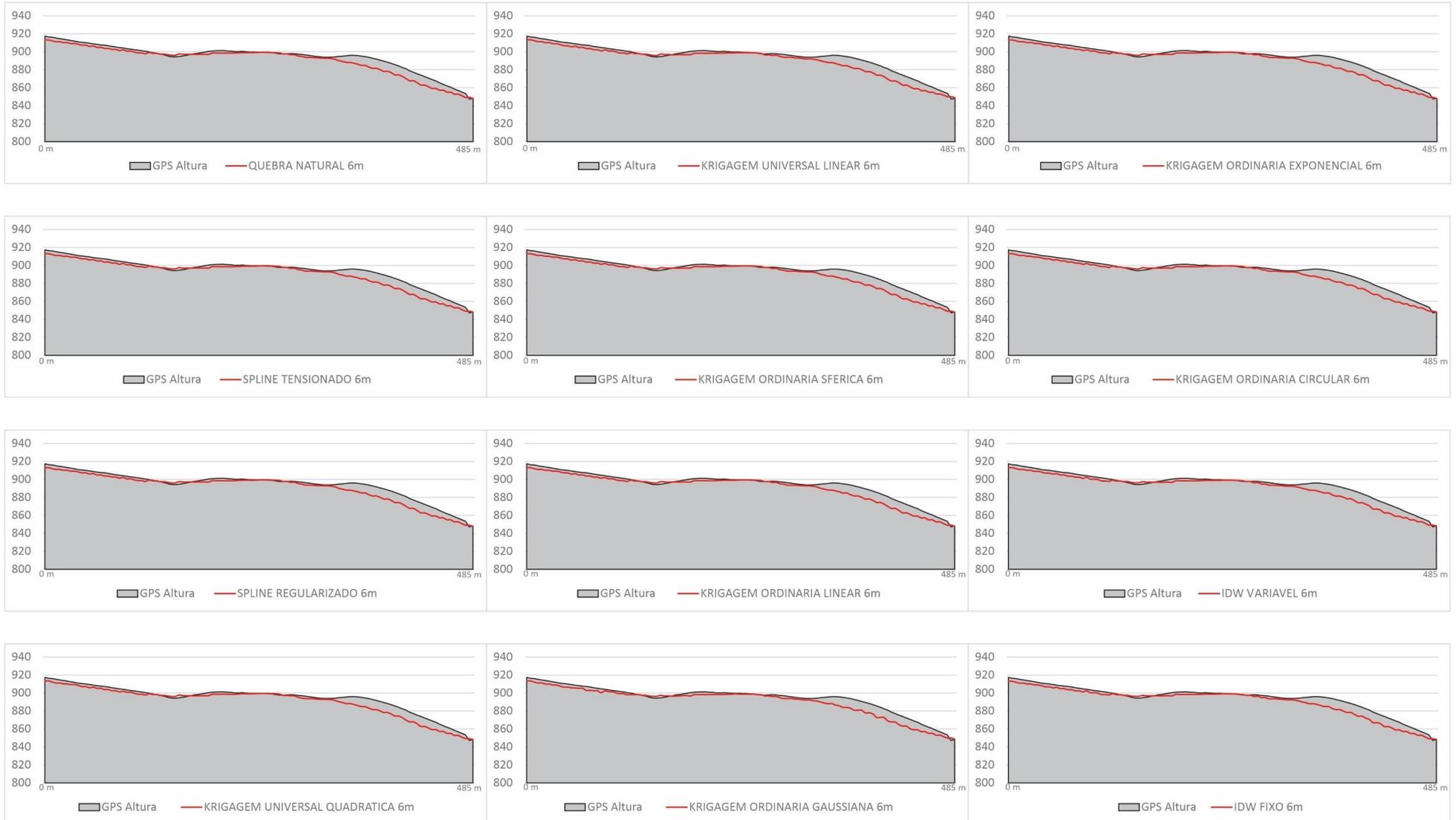
APÊNDICE O

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO PERFIL BR 440 DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 10 m



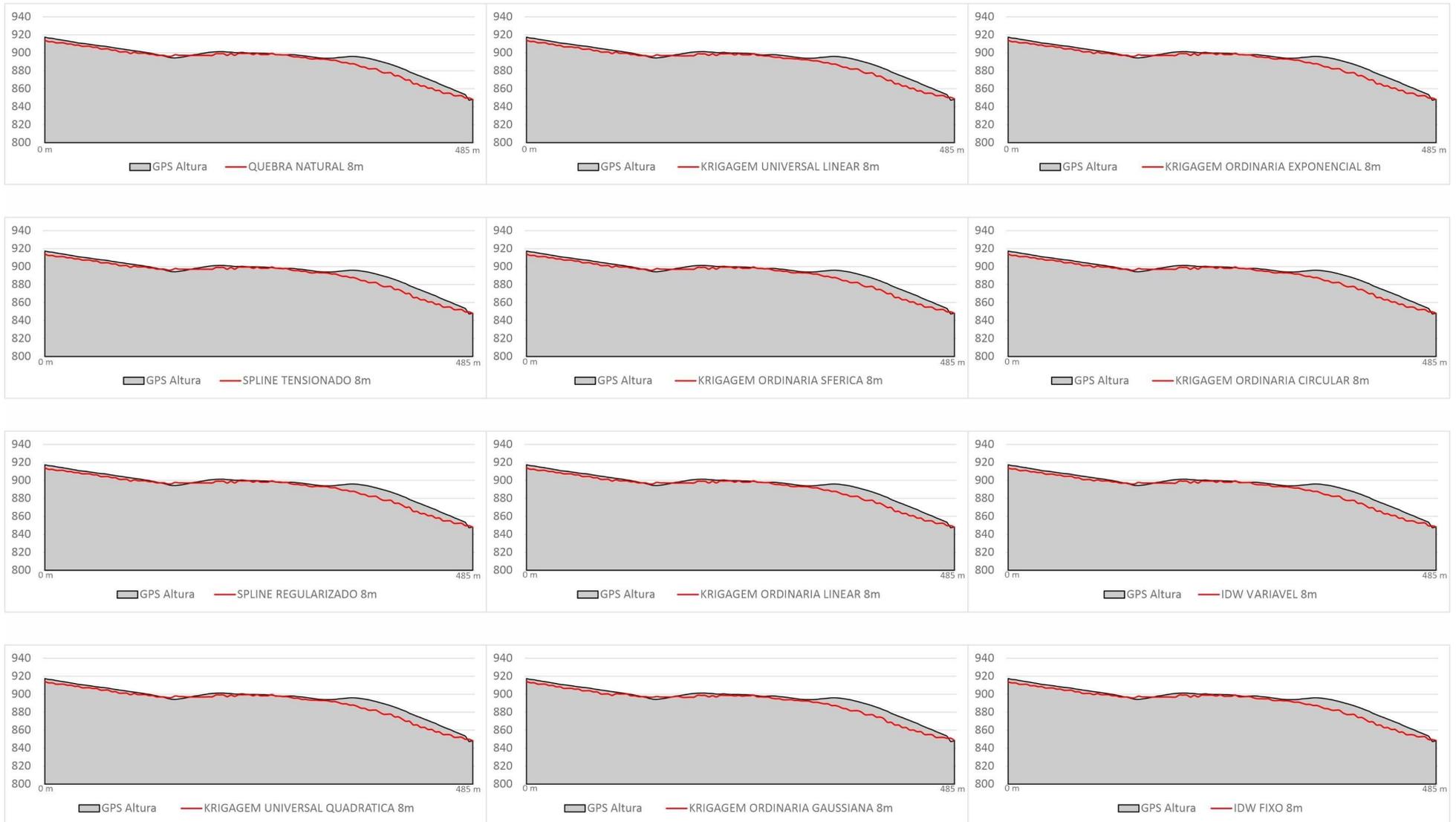
APÊNDICE P

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO PERFIL PASTO DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 6 m



APÊNDICE Q

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO PERFIL PASTO DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 8 m



APÊNDICE R

PERFIS DE RELEVO REFERENTES AO TRAÇADO PERFIL PASTO DE CADA UM DOS MDE GERADOS EM CADA MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO PARA A ESCALA ESPACIAL DE 10 m

