

## SUPERFÍCIES ANALÍTICAS COMO MEIO DE AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO DE DADOS BATIMÉTRICOS

*ARTIFICIAL ANALYTIC SURFACES AS A WAY TO ASSESS BATHYMETRIC DATA PROCESSING STRATEGIES*

Cláudio Bielenki Júnior<sup>1</sup>, Dalva Maria de Castro Vitti<sup>2</sup>, Frederico Fábio Mauad<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Engenheiro Cartógrafo, Mestre em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, Agência Nacional de Águas, Brasília, DF. E-mail: claudio@ana.gov.br

<sup>2</sup>Engenheira Agrimensora, Mestre em Engenharia Urbana, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP. E-mail: dalvacastrovitti@gmail.com

<sup>3</sup>Engenheiro Agrícola, Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP. E-mail: mauadffm@sc.usp.br.

### RESUMO

Os reservatórios desempenham um papel muito importante no gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos e energéticos de diversos países, como o Brasil. A capacidade de armazenamento de um reservatório é influenciada diretamente pelos processos erosivos que ocorrem em suas margens e afluentes. Portanto, é importante realizar levantamentos batimétricos para verificar a situação atual dos reservatórios. Para a elaboração dos Modelos Numéricos de Elevação (MNE), que tem por finalidade reproduzir a superfície de leito de um reservatório, deve-se estabelecer com atenção a quantidade e distribuição dos pontos amostrados. Neste trabalho foram testadas configurações de distribuições geométricas de pontos regulares e não regulares e os algoritmos de interpolação IDW (*Inverse Distance Weighted*), *Spline*, *Topo to Raster*, superfície de tendência (*Trend*) e TIN (*Trianguled Irregular Network*). Os volumes gerados pelos MNE foram comparados com o volume de uma superfície analítica de referência. A distribuição geométrica dos pontos amostrais na área do reservatório afeta a qualidade dos MNE gerados. O interpolador *Trend* apresentou as menores diferenças de volumes para as circunstâncias deste estudo e o interpolador IDW apresentou as maiores diferenças.

**Palavras-chave:** Batimetria; Interpolação; Modelos Numéricos de Elevação.

### ABSTRACT

Reservoirs perform a very important role in the management and planning of water and energy resources of many countries, as Brazil. The storage capacity of a reservoir is directly influenced by erosion processes that occur on its banks and tributaries. Therefore, bathymetric surveys must be conducted for checking the current situation of the reservoirs. In the development of Numerical Elevation Models (NEM), which aim at reproducing the bed surface of a reservoir, the amount and distribution of points that will be collected should be carefully established. The present paper addresses the evaluation of some settings of geometric distributions of points and interpolation algorithms. Trend interpolator showed the smallest volume differences for the circumstances proposed in the study, whereas IDW interpolator exhibited the largest differences.

**Keywords:** Bathymetry; Interpolation; Digital Elevation Model.

### 1 – INTRODUÇÃO

No contexto de gerenciamento de recursos hídricos os reservatórios têm tido papel significativo, já que se tratam de intervenções ao longo dos corpos d'água, de que o homem se utiliza para reservar água das estações chuvosas a fim de garantir a sua oferta quando em períodos de chuvas escassas e regularizar a vazão nos períodos de cheia. A operação destes reservatórios de forma a garantir os usos múltiplos da água depende diretamente da sua capacidade de armazenamento, sendo esta capacidade afetada pelo aporte de sedimentos e sua deposição em seu leito ao longo do tempo.

Assim, faz-se importante o estudo periódico do assoreamento e a potencial perda de capacidade de armazenamento em reservatórios que podem gravemente afetar o abastecimento para o consumo, a geração de energia elétrica, dentre outros usos. Estes estudos passam

necessariamente pela execução de levantamentos batimétricos. A batimetria tem por finalidade reproduzir a superfície abaixo do leito de rios e reservatórios e assim, do ponto de vista de modelagem de superfícies, não difere da tarefa de mapear um terreno com vales e elevações.

Vários autores destacam a importância de uma boa distribuição dos pontos amostrados de cota do terreno a fim de obter uma melhor precisão nos Modelos Numéricos de Elevação (MNE) gerados por meio de interpolação dos dados topográficos (LANE, 1998, LANE; CHANDLER; RICHARDS, 1994 e LI, 1990 e 1992).

Para testar a influência da distribuição geométrica da amostragem de pontos batimétricos e o desempenho dos algoritmos interpoladores foi utilizada uma superfície artificial gerada analiticamente por meio de uma função sinusoidal.

Foram aplicados 6 diferentes configurações de distribuição de pontos e 5 algoritmos de interpolação, que

resultaram em 30 MNE para os quais foram determinados seus volumes. As diferenças de volume apresentadas em relação à superfície analítica, bem como os desvios, foram usadas como meio de avaliação.

## 2 – INTERPOLAÇÃO DE DADOS BATIMÉTRICOS

O tratamento dos dados dos levantamentos batimétricos coletados com ecosondas monofeixe constitui-se primordialmente na interpolação das amostras de profundidades de forma a gerar um modelo numérico que represente o fundo do reservatório.

Merwade (2009) comenta que os métodos de interpolação espacial de leitões de rios assumem que estes apresentam uma tendência isotrópica no sentido do escoamento e anisotrópica na seção transversal. Assim, os métodos de coleta de dados contínua no sentido transversal e discreta no sentido longitudinal consideram essas tendências.

Modelos numéricos de elevação têm sido muito utilizados em geomorfologia. Particularmente, na geomorfologia fluvial, onde a definição da morfologia e rugosidade da superfície é necessária para a determinação de fluxos, transportes de sedimentos e na estimação da mudança de canais, são fundamentais na modelagem numérica de simulações hidrológicas, hidráulicas e sedimentométricas (BOOKER; SEAR; PAYNE, 2001, FRENCH, 2003, FERGUSON *et al.*, 2003 e MILAN, 2009).

Diferenças entre modelos digitais de elevação de diferentes épocas têm sido utilizadas para identificar e quantificar mudanças morfológicas, bem como diferenças de volumes e assim estimar o assoreamento e transporte de sedimentos em cursos d'água e reservatórios. (BRASINGTON; RUMSBY; MCVEY, 2000, BRASINGTON; LANGHAM; RUMSBY, 2003).

Nesse sentido, a qualidade do MNE é essencial para garantir a qualidade dos resultados e influenciar diretamente nas simulações e na acurácia dos volumes de armazenamento estimados (MILAN, 2009 e FULLER *et al.*, 2005).

Segundo Lane, Chandler e Richards (1994) e Lane (1998) a qualidade do MNE depende de fatores, como:

- Qualidade individual de cada ponto amostrado, que é função da precisão do equipamento de medição;
- Densidade de pontos amostrados e utilizados para representar a superfície e
- Distribuição dos pontos amostrados.

A densidade de pontos, bem como a sua distribuição espacial estão diretamente relacionadas à estratégia adotada para o mapeamento e a escolha de equipamentos adequados (HERITAGE *et al.*, 2009).

Segundo Hancock (2006) a qualidade do MNE também pode ser afetada pelo método de interpolação adotado na sua construção. Alguns estudos comparativos entre diferentes técnicas de interpolação têm se mostrado conflitantes e apesar de vasta literatura não há consenso entre os resultados (CHAPLOT *et al.*, 2006).

A qualidade dos modelos de elevação do terreno é afetada pelo desempenho dos métodos de interpolação

espacial e estes pela densidade de amostragem, distribuição espacial da amostra, agrupamento das amostras, tipo de superfície, dados de variância, normalidade dos dados, qualidade das informações secundárias, estratificação, tamanho da grade ou resolução, e interações entre os diferentes fatores (LI; HEAP, 2010 e LI, 1990 e 1992).

O interpolador IDW (*Inverse Distance Weighted*) realiza a estimativa da variável ao longo do espaço e pondera pesos a cada uma das  $n$  amostras mais próximas, que é função do inverso de uma potência da distância, ou seja, quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior o peso atribuído ao ponto amostrado. Esse método simples e clássico é recomendado para quando há alta densidade de amostras e largamente utilizado com o expoente dois, com bons resultados e com o qual recebe a denominação de Inverso do Quadrado da Distância (IQD) (JIMENEZ; DOMEQ, 2008, DEUS *et al.*, 2010, WATSON; PHILIP, 1985, MELLO *et al.*, 2003).

O Método de Curvatura Mínima ou *Spline* é um método de interpolação que estima valores ao usar uma função matemática que minimiza a curvatura da superfície de modo a resultar em uma superfície suave que passa exatamente pelos pontos de entrada.

A função *Topo to Raster* é um interpolador presente no pacote *3D Analyst* da ESRI e está baseado nos trabalhos desenvolvidos por Hutchinson (1988 e 1989) em seu programa ANUDEM. Nogueira e Amaral (2009) explicitam que essa técnica de interpolação foi desenhada com o objetivo específico de converter dados vetoriais em modelos hidrológicos de elevação de terreno exatos. O método utiliza a eficiência computacional da interpolação local, como ponderação do inverso da distância, sem perder a continuidade superficial dos métodos globais de interpolação, como *Krigagem* e *Spline*.

O método de interpolação *Spline* (nesse caso regularizada) faz parte da função de base radial, um método determinístico, exato e não convexo. Este método está recomendado para estimar superfícies com variações suaves e deve ser evitado na espacialização de conjuntos amostrais com tendência (ESRI, 2008).

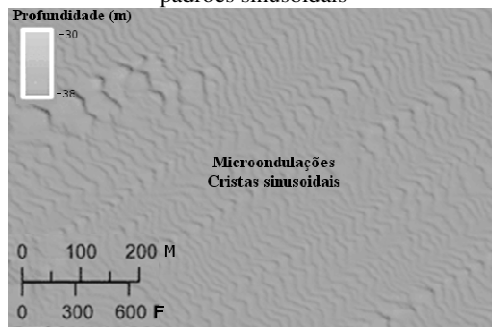
Segundo Landin e Corsi (2001), utilizar superfície de tendência (*Trend*) é o método pelo qual uma superfície contínua é ajustada por critérios de regressão por mínimos quadrados aos valores de  $Z_i$  (amostras) como uma função linear das coordenadas X-Y dos pontos amostrados e irregularmente distribuídos. A equação matemática utilizada para o ajuste da superfície baseia-se em polinômios não-ortogonais e o ajuste é incrementado pela adição de termos adicionais (ordens) à equação polinomial.

O método de interpolação TIN (*Triangulated Irregular Network*) é largamente utilizado na reconstituição de superfícies de leitões hidrográficos. Os pontos amostrados constituem os vértices de uma rede de triângulos que podem ser obtidos por diferentes formas. O método de triangulação de Delaunay, por exemplo, assegura que apenas um vértice ocorra no interior de uma circunferência que envolve um triângulo e maximiza o menor ângulo interno de modo a evitar triângulos com ângulos muito pequenos.

### 3 – METODOLOGIA

McMullen *et al.* (2012) ao analisarem imagens provenientes de imageadores acústicos multifeixes identificaram padrões sinusoidais (Figura 1) para o fundo marinho de forma que pode-se imaginar que uma superfície com este tipo de padrão poderia ser utilizada para simular um fundo de reservatório.

Figura 1 – Imagem acústica multifeixe de fundo marinho com padrões sinusoidais

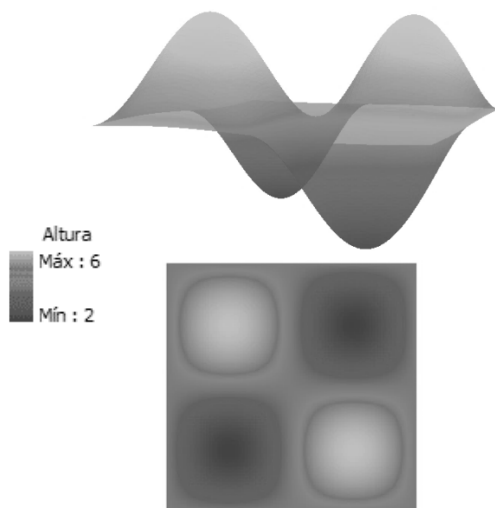


Para esta pesquisa adotou-se uma superfície analítica (Figura 2), matematicamente definida pela equação (1), em que o valor 4 foi adicionado para que as cotas ficassem entre os valores de 2 e 6.

$$F(x,y) = 4 + [2 \cdot \sin(x) \cdot \sin(y)], \quad 0 \leq x \leq 360 \text{ e } 0 \leq y \leq 360 \quad (1)$$

A área disposta de forma quadrada com 3,6 km de lado resulta uma área de 12,96 km<sup>2</sup>. A partir desta superfície foram testadas diferentes estratégias de disposição de pontos amostrais cujo valor de cota atribuídos são os valores correspondentes ao da superfície analítica.

Figura 2 1– Superfície analítica gerada a partir da Equação (1)

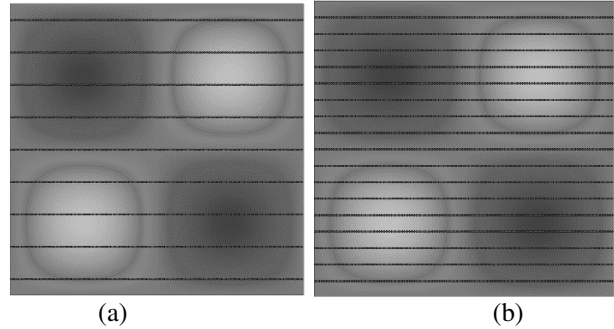


De acordo com as orientações da Agência Nacional de Águas (BRASIL, 2011) para levantamentos batimétricos em reservatórios com área superficial menor que 13 Km<sup>2</sup>, onde se enquadram as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), a coleta de dados com ecobatímetro monofeixe deveria adotar espaçamento entre transectos de 416 m. Após

revisão dessas orientações em 2013, o espaçamento a ser adotado passou a ser de 166 m (BRASIL, 2013).

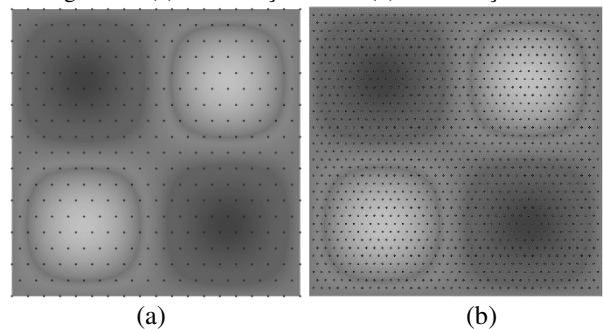
Desta forma, sobre a superfície analítica foram distribuídos transectos com equidistância de 400 m (T400) e 200 m (T200) com pontos amostrais a cada 20 m, totalizando 1.620 e 3.240 pontos, respectivamente. As distribuições de pontos T400 e T200 podem ser visualizadas nas Figuras 3 (a) e (b).

Figura 3 – (a) Distribuição T400 e (b) Distribuição T200



A fim de testar outras distribuições dos pontos sobre a superfície analítica foram amostradas grades regulares espaçadas de 20 e 10 m, totalizando 1.243 e 352 pontos respectivamente. Estas distribuições de pontos podem ser vistas na Figura 4 (a) e (b) e foram denominadas de R20 e R10.

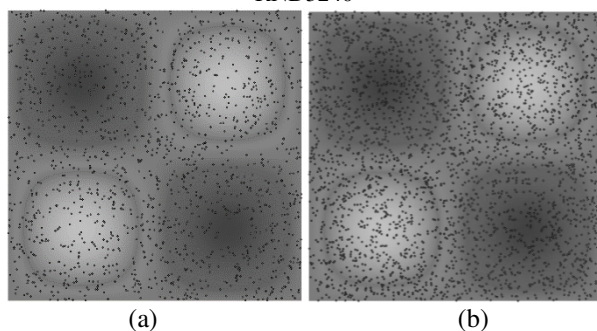
Figura 4 – (a) Distribuição R20 e (b) Distribuição R10



As quantidades de pontos amostrais das distribuições T200 e T400 podem ser distribuídas de forma aleatória sobre a superfície, sem um padrão definido. Para este estudo foram gerados randomicamente 100 distribuições aleatórias para cada uma destas quantidades de pontos amostrais, sendo a média dos volumes calculados utilizados para efeito de comparação. Estas distribuições foram denominadas de RND1620 e RND3240. Um exemplo para cada uma delas pode ser visualizado na Figura 5 (a) e (b).

A partir de cada uma das distribuições de pontos amostrais foram calculados os valores de cotas para cada amostra aplicando os valores das coordenadas X e Y na Equação 1. Estas cotas foram denominadas de ZIdeal.

Figura 5 – (a) Distribuição RND1620 e (b) Distribuição RND3240



Com esses conjuntos de distribuições de pontos amostrais virtuais foram gerados os MNE que representam o fundo do reservatório. Ao comparar as superfícies interpoladas com a superfície analítica conhecida pôde-se representar a diferença entre elas em termos dos volumes de cortes e aterros. O modelo é mais representativo do leito quanto menor a diferença entre os volumes das superfícies.

Ao gerar os MNE com as distribuições propostas avaliou-se algumas alternativas de interpoladores: Inverso da distância ponderada (IDW), mínima curvatura (*Spline*), *Topo to Raster*, superfície de tendência (*Trend*) e rede de triângulos irregulares (TIN).

Para testar os seis modelos de distribuição das amostras para cada um dos cinco métodos de interpolação determinísticos, levando-se em conta a variação aleatória das distribuições RND1620 e RND3240, bem como ao se variar o erro aleatório simulado da precisão do equipamento, foram geradas um total de 4020 batimetrias virtuais que foram comparadas com a superfície analítica.

Para otimizar e automatizar as rotinas de processamento foram confeccionados scripts para o ArcGIS versão 10.1 com a linguagem Python os quais, de forma geral, apresentam a seguinte rotina:

- Geração da superfície analítica de acordo com a Equação 1;
- Criação da distribuição de pontos;
- Cálculo dos valores de ZIdeal a partir da Eq. 1;
- Geração do MNE pela interpolação do ZIdeal;
- Cruzamento do MNE ZIdeal com a superfície analítica (ferramenta CutFill do ArcGIS,);
- Cálculo da diferença de volume entre a superfície gerada com ZIdeal e a superfície analítica;
- Cálculo da média e do desvio padrão das diferenças de volume;
- Cálculo do ZTeste (erro simulado devido a precisão do equipamento);
- Geração do MNE pela interpolação do ZTeste;
- Cruzamento do MNE ZTeste com a superfície analítica, ZIdeal (ferramenta CutFill do ArcGIS,);
- Cálculo da diferença de volume entre as superfícies, para o caso de ZTeste e a superfície analítica;
- Cálculo da média e do desvio padrão das diferenças de volume entre as superfícies ZTeste e ZIdeal.

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Depois da aplicação dos algoritmos Python, os valores das diferenças de volumes das superfícies interpoladas (ZIdeal e ZTeste) e a superfície analítica foram utilizadas como forma de comparação. Nas Tabelas 1 a 6 são apresentados os resultados encontrados para as diferenças de volumes (em unidades de volume) para cada uma das distribuições testadas.

Tabela 1 – Diferenças de volume para a distribuição T200

Interpolador	ZIdeal		ZTeste	
	Valor	Média	σ	
IDW	8.830,95	8.899,32		7,08
Spline	6.586,28	6.830,78		43,31
TIN	2.591,60	2.919,84		28,98
Topo	4.674,47	4.496,51		26,77
Trend	71,94	335,52		48,03

Tabela 2 – Diferenças de volume para a distribuição T400

Interpolador	ZIdeal		ZTeste	
	Valor	Média	σ	
IDW	17.617,74	17.653,66		5,28
Spline	14.509,45	14.791,33		57,03
TIN	5.724,68	5.847,81		29,56
Topo	8.891,59	8.776,60		33,73
Trend	586,13	1.024,02		385,22

Tabela 3 – Diferenças de volume para a distribuição R10

Interpolador	ZIdeal		ZTeste	
	Valor	Média	σ	
IDW	3.831,32	3.928,82		22,85
Spline	92,38	1.134,84		18,33
TIN	992,02	1.454,82		27,22
Topo	2.477,13	2.531,86		36,89
Trend	72,37	321,16		25,29

Tabela 4 – Diferenças de volume para a distribuição R20

Interpolador	ZIdeal		ZTeste	
	Valor	Média	σ	
IDW	6679,86	6.728,88		52,67
Spline	536,79	1.319,49		53,29
TIN	2.060,37	2.244,69		65,13
Topo	4.389,99	4.433,02		68,75
Trend	108,71	484,46		46,22

Tabela 5 – Diferenças de volume para a distribuição RND1620

Interpolador	ZIdeal		ZTeste	
	Média	σ	Média	σ
IDW	6.658,81	1.077,04	6.684,47	1.045,68
Spline	137,19	10,85	2.318,01	178,82
TIN	981,57	29,12	1.376,68	36,72
Topo	4.627,07	100,75	4.517,80	107,00
Trend	4,48	0,17	282,24	23,96

Tabela 6 – Diferenças de volume para a distribuição RND3240

Interpolador	ZIdeal		ZTeste	
	Média	σ	Média	Σ
IDW	5.342,76	949,41	5.485,51	889,30
Spline	58,48	3,96	2.269,16	106,47
TIN	517,83	12,52	1.062,46	18,00
Topo	1.403,42	39,32	1.411,22	47,91
Trend	4,52	0,15	198,40	18,99

Os valores de média e desvio se aplicam aos casos em que foram gerados 100 modelos aleatórios, seja pela variação da posição dos pontos nas distribuições, ou pela variação do erro introduzido no sentido de simular a precisão do equipamento.

Os valores de diferenças de volumes para cada distribuição foram agrupados em gráficos, em escala logarítmica, para cada um dos interpoladores testados, a fim de facilitar a visualização dos resultados e são apresentados nas Figuras 6 a 10.

Figura 6 – Diferenças de volumes para o interpolador IDW

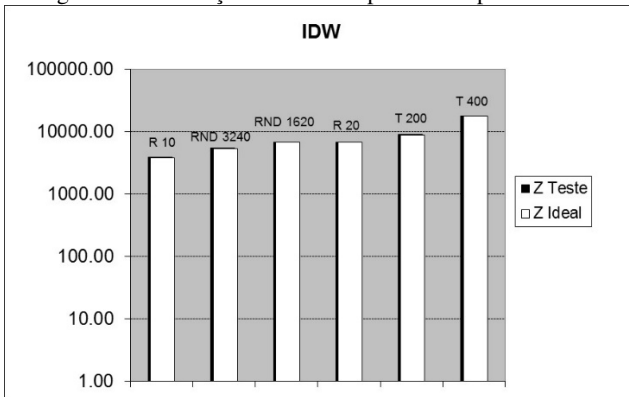


Figura 7 – Diferenças de volumes para o interpolador Mínima Curvatura (Spline)

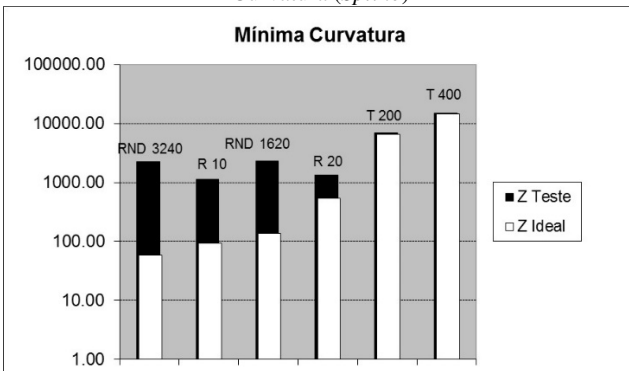


Figura 8 – Diferenças de volumes para o interpolador TIN

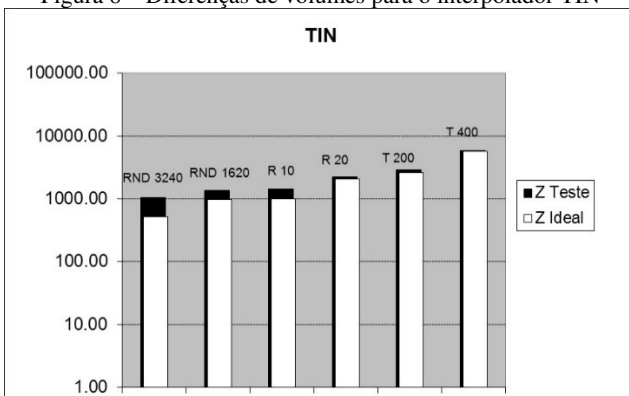


Figura 9 – Diferenças de volumes para o interpolador Topo to Raster

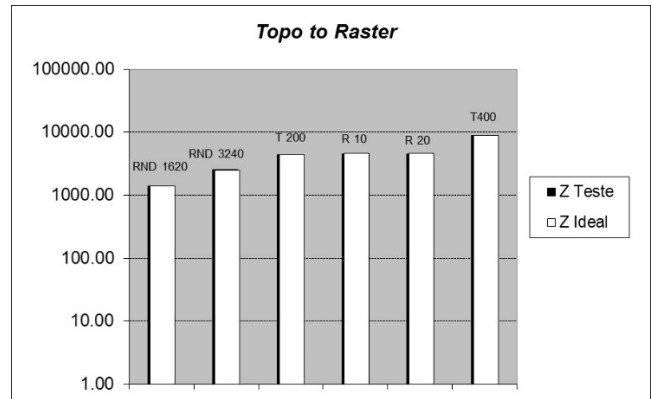
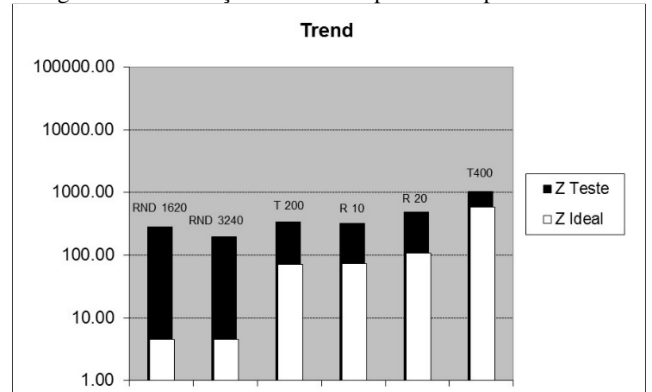


Figura 10 – Diferenças de volumes para o interpolador Trend



Da análise dos resultados encontrados, em termos de diferenças de volumes, verifica-se que as distribuições dos pontos amostrais em transectos (T200 e T400) apresentaram os piores resultados por não garantir suficiente amostragem de pontos para caracterizar as feições. Esta disposição de pontos não se mostrou satisfatória para os interpoladores testados. A densidade é um fator determinante para a performance dos interpoladores como relatado por Li, (1990 e 1992), Chaplot *et al.* (2006) e por Li e Heap (2010).

Apesar da grande diferença no número de pontos amostrados entre as distribuições R10 e R20 (distribuições regulares) para as distribuições RND1620 e RND3240 (distribuições randômicas não regulares), não existiram grandes diferenças entre os resultados para alguns interpoladores. Entretanto, cabe ressaltar que uma distribuição regular de pontos amostrais é de difícil execução com coletas em sistemas embarcados como os disponíveis atualmente.

Os interpoladores *Trend* e *Mínima Curvatura* ou *Spline* apresentaram uma variação significativa quando da introdução de erros aleatórios que simularam a precisão do equipamento. Os valores da média das diferenças de volume foram superiores em relação aos valores calculados com o *ZIdeal* bem como os desvios padrões foram significativos, o que demonstra que estes interpoladores se comportaram sensíveis às pequenas variações. Chaplot *et al.* (2006) narraram que o interpolador *Spline* apresentou melhor desempenho em *landforms* com fraco coeficiente de variação da elevação, o que explica a sensibilidade deste interpolador quando os erros aleatórios foram introduzidos.

De forma geral, o interpolador *Trend* apresentou as menores diferenças de volumes para as situações testadas. Como enunciado por Landim e Corsi (2001) e por Merwade (2009), esse interpolador apresentou bons resultados para amostras irregularmente distribuídas e com tendência. Já o interpolador IDW apresentou as maiores diferenças de volume entre as superfícies comparadas. Chaplot *et al.* (2006) relataram que o interpolador IDW apresentou resultados ligeiramente melhores para *landforms* com forte coeficiente de variação da elevação.

## CONCLUSÕES

A distribuição regular ou irregular de dados batimétricos teve pouca influência nos MNE para os interpoladores testados, sendo mais significativa a densidade de pontos. O método de distribuição de dados por transectos apresentou o pior resultado.

A escolha do interpolador e da quantidade e distribuição dos pontos amostrados influenciam significativamente a precisão dos modelos numéricos de elevação que são gerados. O interpolador *Trend* foi o que mostrou o melhor desempenho para geração dos MNE.

No caso deste estudo, a facilidade de programação no ambiente Python viabilizou o processamento de 4020 batimetrias virtuais, o que não é possível com batimetrias reais, em um curto espaço de tempo e praticamente sem custos operacionais. Com esta facilidade, outras superfícies podem ser testadas e mesmo outros interpoladores adicionados aos testes, bem como novas formas de distribuição de pontos amostrais.

## REFERÊNCIAS

- BOOKER, D. J.; SEAR, D. A.; PAYNE, J. A. Modelling three-dimensional flow structures and patterns of boundary shear stress in a natural pool-riffle sequence. **Earth Surface Processes and Landforms**, n. 26, p. 553-576, 2001. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.210>.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Brasília, 2011, 40 p.
- \_\_\_\_\_. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume (Revisão)**, Brasília, 2013, 40 p.
- BRASINGTON, J.; RUMSBY, B. T.; MCVEY, R. A. Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high-resolution GPS-based survey. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 25, p. 973-990, 2000. [http://dx.doi.org/10.1002/1096-9837\(200008\)25:9<973::AID-ESP111>3.3.CO;2-P](http://dx.doi.org/10.1002/1096-9837(200008)25:9<973::AID-ESP111>3.3.CO;2-P). [http://dx.doi.org/10.1002/1096-9837\(200008\)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y](http://dx.doi.org/10.1002/1096-9837(200008)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y)
- BRASINGTON, J.; LANGHAM, J.; RUMSBY, B. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. **Geomorphology**, v. 53, p. 299-316, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00320-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00320-3).
- CHAPLOT, V.; DARBOUX, F.; BOURENNANE, H.; LEGUÉDOIS, S.; SILVERA, N.; PHACHOMPHON, K. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. **Geomorphology**, v. 77, p. 126-141, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.12.010>.
- DEUS, B. V.; ZEILHOFER, P.; ARAUJO, G. C.; SANTOS, A. S. L. Interpolação pluviométrica na Bacia do Alto e Médio Rio Teles Pires: uma análise de séries históricas e interpoladores. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais...** 3, Recife. Anais: UFPE, p. 1-7, 2010.
- FERGUSON, R. I.; PARSONS, D. R.; LANE, S. N.; HARDY, R. J. Flow in meander bends with recirculation at the inner bank. **Water Resources Research**, v. 39, n. 11, p. 1332, 2003. <http://dx.doi.org/10.1029/2003WR001965>.
- FRENCH, J. R. Airborne LiDAR in support of geomorphological and hydraulic modelling. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 28, n. 3, p. 321-335, March 2003. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.484>.
- FULLER, I. C.; LARGE, A. R. G.; HERITAGE, G. L.; MILAN, D. J.; CHARLTON, M. E. Derivation of reach-scale sediment transfers in the River Coquet, Northumberland, UK. In: Blum, M.; Marriott, S.; Leclair, S. (Eds.), **Fluvial Sedimentology VII**, IAS Special Publication, v. 35. Wiley-Blackwell, Chichester, UK, p. 61-74, 2005.
- HANCOCK, G. R. The impact of different gridding methods on catchment geomorphology and soil erosion over long timescales using a landscape evolution model. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, p. 1035-1050, 2006. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1306>.
- HERITAGE, G. L.; MILAN, D. J.; LARGE, R. G.; FULLER, I. C. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. **Geomorphology**, v. 112, n. 3-4, p. 334-344 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.024>.
- HUTCHINSON, M. F. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In: International Symposium on Spatial Data Handling. 3, 1988, Sydney. **Anais...** Sydney, p. 117-134, 1988.
- \_\_\_\_\_. A new procedure for gridding elevation and stream live data with automatic removal of spurious pits.. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5). IHO, Manual on Hydrography: **International Hydrographic Bureau**, 2005, 540 p.
- JIMENEZ, K. Q.; DOMEQ, F. M. Estimación de chuva usando métodos de interpolação. Porto Alegre: **Instituto de Pesquisas Hidráulicas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008, 16 p.
- LANDIM, P. M. B.; CORSI, A. C. Cálculo de superfícies de tendência, por regressão polinomial, pelo *SURFER 6*. DGA, IGCE, UNESP, Rio Claro, Lab. **Geomatemática**, Texto Didático 05, 2001, 11 p. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 15 jun. 2014.
- LANE, S. N. The use of digital terrainmodelling in the understanding of dynamic river systems. In: Lane, S. N.; Richards, K. S.; Chandler, J. H. (Eds.), **Landform Monitoring, Modelling and Analysis**. John Wiley and Son Ltd., Chichester, UK, p. 311-342, 1998. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3290190406>.

- LANE, S. N.; CHANDLER, J. H.; RICHARDS, K. S. Developments in monitoring and modelling small-scale river bed topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 19, p. 349-368, 1994.
- LI, Z. **Sampling Strategy and Accuracy Assessment for Digital Terrain Modelling**, Ph.D. Thesis, University of Glasgow, 1990, 299 p.
- \_\_\_\_\_. Variation of the accuracy of digital terrain models with sampling interval, **Photogrammetric Record**, v. 14 n. 79, p. 113-128, 1992. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.1992.tb00211.x>.
- LI, J.; HEAP, A. D. Review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. **Marine & Coastal Environment**, PMD, Geoscience Australia, 2010.
- MERWADE, V. Effect of spatial trends on interpolation of river bathymetry. **Journal of Hydrology**, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.026>.
- McMULLEN, K. Y.; POPPE, L. J.; DANFORTH, W. W.; BLACKWOOD, D. S.; SCHAEER, J. D.; GLOMB, K. A.; DORAN, E. F. Sea-floor geology of Long Island Sound north of Duck Pond Point, New York: U.S. **Geological Survey Open-File Report**, 2012.
- MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; SILVA, M. S. *Krigagem* e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 925-933, 2003.
- MILAN, D. J. Terrestrial laser-scan derived topographic and roughness data for hydraulic modelling of gravel-bed rivers. *In*: Heritage, G. L.; Large, A. R. G. (Eds.), **Laser Scanning for the Environmental Sciences**. Wiley-Blackwell, Chichester, UK, p. 133-146, 2009. <http://dx.doi.org/10.1002/9781444311952.ch9>.
- NOGUEIRA, J. D. L.; AMARAL, R. F. A. Comparação entre os métodos de interpolação (*Krigagem* e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha, Touros, RN. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, p. 4117-4123, 2009.
- WATSON, D. F.; PHILIP, G. M. A Refinement of inverse distance weighted interpolation. **GeoProcessing**, v. 2, p. 315-327, 1985.