

Modelagem de relevo submerso através de geoprocessamento: Reservatório Guarapiranga – SP

Philippe Riskalla Leal¹
Marcelo Luiz Martins Pompeu²
Jorge Pimentel Cintra³
Jorge Kazuo Yamamoto⁴
Rozely Ferreira dos Santos⁵
Marisa Dantas Bitencourt⁶

¹ Universidade de São Paulo - USP/Instituto de Ecologia
São Paulo - SP, Brasil
Leal.philipe@gmail.com

² Universidade de São Paulo - USP/Instituto de Ecologia
São Paulo - SP, Brasil
mpompeo@ib.usp.br

³ Universidade de São Paulo - USP/ Escola politécnica da USP/Departamento de Engenharia de Transportes
São Paulo - SP, Brasil
jpcintra@usp.br

⁴ Universidade de São Paulo - USP/ Instituto de Geociências/ *Departamento* de Mineralogia e Geotectônica
São Paulo - SP, Brasil
jkyamamo@usp.br

⁵ Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo/ Departamento de Recursos Hídricos
Campinas – SP, Brasil
rozefs@uol.com.br/ rozefs@ib.usp.br

⁶ Universidade de São Paulo - USP/Instituto de Ecologia
São Paulo - SP, Brasil
tencourt@ib.usp.br

Abstract: This work aimed at a Fishfinder bathymetric data processing in GIS (Geographic Information System) environment, in order to assess lentic ecosystem morphometry. The Reservoir Guarapiranga has been utilized as the model environment for data acquisition and results interpretation. This reservoir is of major importance to the São Paulo Metropolitan Region – Brazil, responsible for 20% of its water supply. It is considered a shallow reservoir, with highly urbanized margins, and it is one of the eldest reservoirs of the region (110 years). The bathymetric data has been assessed during July 29 and 30 of 2015, relative to the water levels 735.11 and 735.10 meters respectively, through the GARMIN GPSmap (model 421S). The reservoir's margins have been assessed through visual vectorization based on the water limits derived from the ALOS-AVNIR images of 03/09/2010. 18.677 bathymetric points have been assessed through the Fishfinder, and others 3488 points from the margins visual vectorization. Our results are: a) the bathymetric data interpolation processing which best represented the underwater surface has been the Triangular Irregular Network (TIN) with Delaunay triangulation; b) the reservoir depth varied between zero e 17m; c) a useful volume of 160.09 hm³; d) a projected area of 24.85 Km² of free water surface (with no macrophytes, exposed soils or islands); e) real surface area of 45.32 Km² of free water surface, which is the reservoirs bed real surface. Conclusions: a) the Fishfinder has properly served its purposes, presenting easy handling and low cost; b) the reservoir's morphometric structures perception became evident with the TIN interpolation, denoting its dependency to the interpolator applied; c) by comparing the

reservoir's original volume with the one found by this research, one may notice little difference; d) the GIS tools have shown to be applicable to tridimensional studies, which are of major importance for limnological studies.

Palavras-chave: surface terrain modeling; remote sensing; spatial interpolation; modelagem de superfície de terreno; sensoriamento remoto; interpolação espacial.

Introdução

A Barragem do Reservatório Guarapiranga teve sua construção iniciada em 1906, com conclusão em 1909 com a finalidade de regularizar a vazão do rio Tietê e garantir a produção de energia elétrica em Santana do Parnaíba. A partir de 1927, a represa passou a ser utilizada para abastecimento público de São Paulo (Cetesb 2001, Isa 2006). Sua ocupação de entorno foi marcada por loteamentos residenciais, clubes, chácaras e marinas, atraídos por ofertas de lazer e pela qualidade da paisagem. Hoje, o reservatório apresenta regiões de urbanização intensa a leste, norte e sul; moradias irregulares a oeste; algumas pequenas manchas de vegetação remanescente de entorno próximas à margem do reservatório (Eiger et al., 2012); e um parque (Parque do Guarapiranga) com cobertura vegetativa significativa; tendo uma população de aproximadamente 550 mil habitantes ocupando seu entorno (Caleffi, 2000).

É um reservatório que abrange 4 grandes afluentes. Apresenta uma vazão média de 11,8 m³/s, e um volume de armazenamento útil de 191610x10³ m³ (Mozeto et al., 2001; Whately e Cunha, 2006). Apresenta uma área de drenagem equivalente a 631 Km² (Padial, 2008), é considerado o segundo maior manancial dos sistemas de abastecimento da RMSP. Abastece quase 30% da população da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

O Reservatório Guarapiranga é considerado um ambiente com alta taxa de sedimentação (Campagnoli, 2002), comparável a áreas de rejeito de mineração, o tempo de vida útil do reservatório e a contribuição feita pelas sub-bacias (Nochi, 2006).

Frente ao estado de conservação e a importância deste reservatório para RMSP, faz-se necessário o monitoramento frequente do seu assoreamento. Para tanto, este monitoramento precisaria ser de baixo custo (homem hora e equipamento), replicável e preciso.

Sabe-se, contudo, que levantamentos batimétricos não constituem uma tarefa fácil (Espartel, 1987). O esforço amostral depende da extensão da lâmina d'água, demandando tempo, recursos humanos e financeiros.

Na literatura, são muitos os métodos de mensuração batimétrica de corpos hídricos. A decisão do método a ser empregado fica dependente da escala de levantamento, em razão das diversas finalidades dos recursos hídricos, e que cada situação exige uma metodologia ou técnica na execução diferente (Danton e Bilhalva, 2013). Ainda, ressalta-se a necessidade da padronização dos dados batimétricos para análises ambientais temporais, tais como estudos de sedimentação e perda de potencial hídrico de corpos d'água. Contudo, essa padronização é raramente vista na literatura, dificultando estudos comparativos de corpos hídricos. Essa padronização pode ser feita transformando os dados batimétricos em função de um referencial estático ou padrão, tal como a altimetria da região – obtida a partir de sua cota hídrica.

Por fim, há a etapa de interpolação dos dados batimétricos/altimétricos, para obtenção da imagem DEM (Digital Elevation Model). Dentre os inúmeros métodos de interpolação (matemáticos, trigonométricos ou geoestatísticos, segundo Landim, 2000), a geração do DEM com relativa acurácia depende: do interpolador adotado; da escala de trabalho; e da eficiência no esforço amostral da variável espacial (Rakhmatullaev et al. 2011).

Objetivos

- A) modelar o relevo submerso do Reservatório Guarapiranga em ambiente de SIG (DEM - modelo digital de elevação ou *digital elevation model*).
- B) determinar a superfície real do sedimento do reservatório.
- C) determinar o volume disponível do reservatório.

Materiais e Métodos

1. Área de Estudo

O reservatório Guarapiranga se situa numa sub-bacia do Alto Tietê, São Paulo - Brasil, a 23° 43'S e 46° 32'O (WGS-84), sob clima tropical, a aproximadamente 742 metros do nível do mar. A bacia hidrográfica Guarapiranga é situada na região sudoeste da Região Metropolitana de São Paulo principalmente nos municípios de São Paulo, Embu, Itapeverica da Serra e Embu-Guaçu e em pequena parte os municípios de Cotia, São Lourenço e Juquitiba (Figura 1).

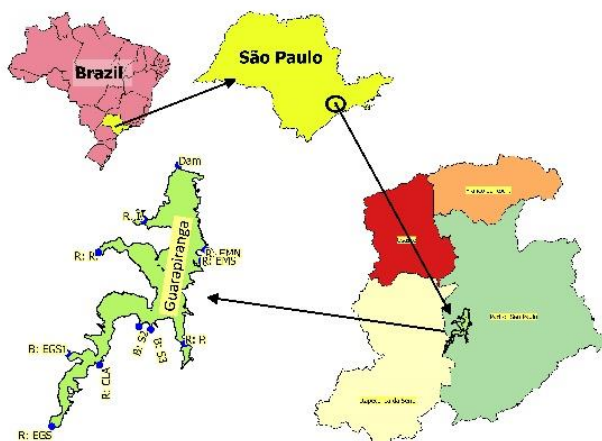


Figura 1: Localização do Reservatório Guarapiranga – SP, Brasil. Adaptado de: IBGE (2016).

2. Amostragem Batimétrica

Os pontos batimétricos foram coletados com o auxílio do Fishfinder (GARMIN GPSmap, modelo 421S) acoplado a um sonar na linha d'água e um data-log georreferenciado (Datum: WGS84, Projeção: UTM 23S), tal como metodologia aplicada em Danton e Bilhalva (2013) e Resck et al. (2007).

Para padronização amostral das leituras do Fishfinder, adotou-se 17 km/h como a velocidade padrão da embarcação para obtenção dos pontos batimétricos. A etapa seguinte foi de delimitação do reservatório.

3. Delimitação da lâmina d'água

Utilizou-se do programa QUANTUM-GIS (versão 2.14.1 Essen) e as imagens do satélite ALOS, (Advanced Land Observing Satellite), sensor AVNIR (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer), para digitalização visual das margens do reservatório. A imagem utilizada é referente à data 09/03/2010.

O arquivo (vetorial) gerado a partir da digitalização visual foi posteriormente reduzido de forma que esse representasse somente o espelho d'água livre (sem macrófitas flutuantes ou fixas, solo exposto ou ilhas) do reservatório. A partir dessa nova região, denominada de Superfície de água Livre (SAL) que os cálculos morfométricos foram baseados.

4. Método de Padronização dos Dados Batimétricos do Reservatório

Para a padronização altimétrica, utilizou-se dos dados diários das cotas da lâmina d'água disponibilizados pela EMAE, calculados a partir da Equação 1. $A_{(P(i))}$ é a altitude do Ponto_(i). $CH_{(j)}$ é a cota hídrica referente ao dia do levantamento batimétrico (j). $P_{(i)}$ é a profundidade do Ponto_(i).

$$A_{(P(i))} = CH_{(j)} - P_{(i)} \quad (1)$$

5. Método para Interpolação espacial e construção dos Mapas DEM

Para construção da imagem DEM, utilizou-se do modelo de interpolação da rede de triangulação irregular (Triangulated Irregular Network - TIN) baseado no critério de Delaunay (princípio de circunferência concêntrica). Adotou-se este método por 5 características específicas: garantir o mínimo e o máximo observados durante as amostragens batimétricas; garantir a eficiência da interpolação mesmo para densos pontos amostrais; facilidade na interpretação dos dados; por ser um método já largamente utilizado e aceito nos programas SIG; permitir discontinuidades abruptas de terreno (Mitas e Mitasova, 1999; Sárközy et al., 1998; Sutton et al., 2008).

6. Método de conversão do relevo projetado para o real

Utilizou-se da expansão SEXTANTE do software QUANTUM-GIS para obtenção das primeiras derivadas parciais para todo o sedimento do reservatório, sendo elas a primeira derivada parcial no sentido norte-sul (dY) e a Leste-Oeste (dX) de acordo com Sá (2014).

Através das derivadas parciais do sedimento, (dY e dX) de cada célula da matriz da batimetria do reservatório Guarapiranga, seguiu-se a metodologia descrita por Horn (1981) para o cálculo da superfície real do sedimento.

Para cálculo de área de superfície real, utilizou-se da projeção UTM 23S a partir do DATUM WGS84. A Equação 2 descreve o cálculo da superfície real do sedimento (SRS). X representa a dimensão leste-oeste (direção leste-oeste) da célula (i). Y representa a dimensão norte-sul da célula (direção norte-sul).

$$SRS = [X(i) / \cosine(dx)] * [Y(i) / \cosine(dy)] \quad (2)$$

7. Método de cálculo do volume e Hipsometria

Uma vez obtida a SRS do Reservatório Guarapiranga, levantaram-se os valores volumétricos do reservatório pelo cálculo volumétrico no próprio QUANTUM-GIS através de seu SEXTANTE “hypsoetry” e no SURFER (versão 5.0) a fim de validar os resultados do próprio SEXTANTE. Os resultados volumétricos aqui obtidos serviram de base comparativa com outras referências científicas do mesmo reservatório, a fim de validar o método batimétrico adotado.

Resultados e Discussão

1. Levantamento batimétrico

Através do levantamento batimétrico, obteve-se um total de 18.677 pontos advindos do Fishfinder e 3488 advindos da vetorização visual a partir das imagens ALOS-AVNIR. A figura 2A é o resultado da digitalização das margens do reservatório. A figura 2B é o esforço amostral obtido a partir do Fishfinder.

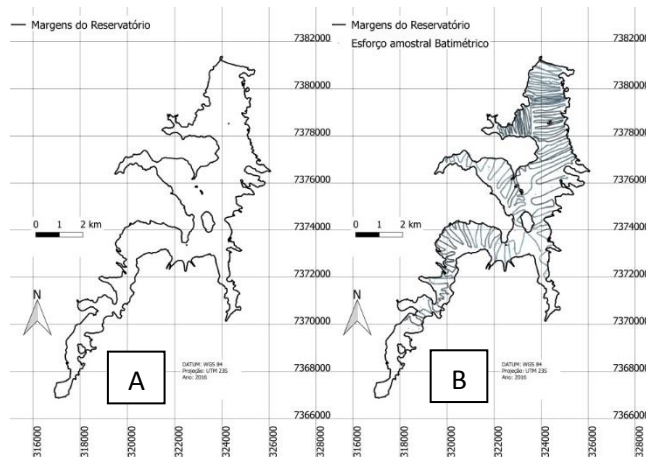


Figura 2A) Margens do reservatório a partir das imagens ALOS-AVNIR.

Figura 2B) Esforço amostral relativo aos dias 29 e 30 de julho 2015, obtidos pelo Fishfinder.

2. Interpolação do relevo submerso

A figura 3 consiste no mapa batimétrico obtido por triangulação de rede irregular – TIN. Sua representação em níveis de cinza aponta que os valores batimétricos do reservatório foram transformados em altitude (altura relativa ao nível do mar).

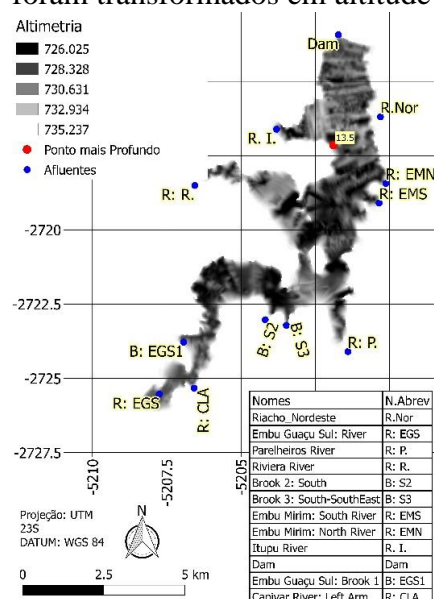


Figura 3: Mapa batimétrico do Reservatório Guarapiranga por TIN. Valores de profundidade transformados em altimetria para fins de comparabilidade entre diferentes fontes de trabalho e datas pretéritas. Ponto máximo de profundidade destacado em vermelho. Afluentes destacados em azul (pontos azuis).

3. Resultado do cálculo da SRS

Através do programa QUANTUM-GIS (QGIS – versão Essen 2.14.1), obtiveram-se os resultados do SRS, e foram comparados à literatura (Tabela 1).

Tabela 1: Parâmetros Morfométricos do Reservatório Guarapiranga.

Nome	Este trabalho ^a	Nishimura (2012)	Mozeto et al (2001)	EMAE ^b (sem data)	Queiroz (2014)	CETESB (2002)	Kleerekoper (1939)
Área Total Planar (Km ²)	24,85 ^{aj}	34 ^d	-	33,91 ^h	27,78 ^c	33 ^h	35 ^h
Área Superficial do Sedimento (Km ²)	45,32 ^{aj}	-	-		-	-	
Perímetro (Km)	93,27 ^{aj}	85 ^d	-	-	-	-	-
Máxima Profundidade (metros)	13,5 ^a	-	-	-	-	-	13 ^c
Profundidade Média (metros)	5,72 ^a	7 ^f	-	5,83 ^h	-	7 ^h	5,7 ^c
Razão Área/Perímetro	0,266 ^j	0,4 ^c	-	-	-	-	-
Volume Útil (hm ³)	160,09 ^{aj}	-	191,6 ^c	191,610 ⁱ	-	194 ^c	-
Volume Máximo Maximorum (hm ³)	-	-	-	197,631 ^g	-	-	-

^a Cota Hídrica de 735,64m (baseado na cota do dia de obtenção da imagem do Satélite ALOS – 09/03/2010)

^b EMAE - Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A.

^c Cota hídrica desconhecida ou não declarada pelo autor

^d CETESB (1991)

^e Whately e Cunha (2006)

^f CETESB (2002)

^g Volume de Armazenamento Total – Cota 737,60 (nível máximo maximorum).

^h Sem descrição do tipo de área (real ou planar), da cota, ou do tipo de cálculo de volume adotado.

ⁱ Volume de Armazenamento útil – cota de 736,62

^j Valores relativos ao SAL (Superfície livre de água)

A diferença entre os volumes de Mozeto et al. (2011) e EMAE (sem data) para com o obtido neste trabalho poderia ser explicado como: a) pela diferença entre os métodos utilizados para o cálculo do volume, e/ou da alta taxa de sedimentação da região, tal como apresentado e discutido por Guimarães (2011) e Campagnoli (2002); b) pela delimitação das margens do reservatório adotada. Contudo, esses autores não descrevem os métodos utilizados para delimitação das margens do reservatório, do levantamento batimétrico, ou dos cálculos volumétricos adotados, dificultando sua comparabilidade com demais trabalhos no mesmo reservatório.

Observou-se que, ao se extrair a diferença volumétrica normalizada para mesma cota hídrica de 7365,64m entre os volumes obtidos por este trabalho - referente a cota de 732,25m - e pelos respectivos autores Mozeto et al (2011) e EMAE (sem data), o volume útil do Reservatório Guarapiranga apresentado pela EMAE é significativamente menor do que aquele encontrado por este trabalho. Esse fato levanta a hipótese de que as superfícies do espelho d'água estimadas por Campagnoli (2002) e Guimarães (2011) para a mesma cota hídrica eram menores do que a levantada por esta pesquisa. Essa hipótese se fortalece, já que o método de sondagem original das margens do reservatório é antigo (com outra metodologia), e o próprio processo de lixiviação e degradação das margens do Reservatório Guarapiranga estão presentes a muitas décadas, alterando seu leito.

A partir da Figura , observa-se o padrão hipsográfico do Reservatório Guarapiranga. Nota-se que a maior porção do volume do reservatório reside nas maiores cotas altimétricas de baixa profundidade e alta superfície do espelho d'água. A redução do volume do Reservatório Guarapiranga se manteve constante até 20% de sua cota mínima, a qual, em seguida teve uma abrupta queda do estoque hídrico do reservatório até atingir seu 0%. Um comportamento típico de corpos d'água rasos (Vivoni et al. 2008; Sternai et al., 2011; Shahidian et al. 2012).

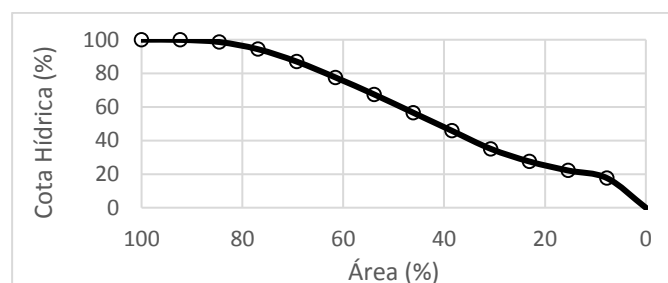


Figura 4: Curva Hipsométrica do Reservatório Guarapiranga (relação volume, área e cota batimétrica).

Conclusão

- a) o Fishfinder serviu bem ao seu propósito por apresentar fácil manipulação e baixo custo.
- b) a percepção das estruturas morfométricas se mostrou dependente do interpolador, sendo que o TIN se mostrou adequado para este tipo de estudo.
- c) ao comparar o volume original com o encontrado por esta pesquisa, verificou-se uma pequena variação volumétrica apesar de não haver registros de procedimentos de dragagem durante o período.
- d) as ferramentas de SIG, em especial o QUANTUM-GIS, mostram-se úteis para estudos tridimensionais importantes para a limnologia.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à FAPESP (Processo N° 14/2258-1), à CAPES (Bolsa de Mestrado), ao Instituto de Biociências (IB) da Universidade de São Paulo (USP); aos nossos parceiros; aos nossos familiares e amigos.

Referências

- Caleffi S. Impacto do uso de sulfato de cobre sobre o zooplâncton na represa Guarapiranga. In: Espíndola E.L.G., Paschoal C.M.R.B., Rocha O., Bohrer M.B.C., Oliveira Neto A.L. (eds). Ecotoxicologia: Perspectivas para o Século XXI. São Carlos, RiMa. p. 573, 2000.
- Campagnoli, F. A aplicação do assoreamento na definição de Geoindicadores ambientais em áreas urbanas – Exemplo na Bacia do Alto Tietê, SP. São Paulo. Tese (Doutoramento em Geoquímica e Geotectônica) – Escola Politécnica (POLI – USP), 2002.
- CETESB (São Paulo). Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo- 2000. São Paulo: CETESB, p. 214, 2001.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. (São Paulo). Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo 2001. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo, p. 227, 2002.
- Danton, W.; Bilhalva, D. B. Batimetria de Pequenos Reservatórios através de Metodologia Convencional e Alternativa. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, Brasil, 2013.
- Eiger et al. Modelagem Matemática de Cargas Difusas na Bacia do Guarapiranga, São Paulo. In XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, vol. XXXIII, p. 1–24, 2012. DOI: 10.1007/s13398-014-0173-7.2
- Empresa Metropolitana de Águas e Energia (EMAE). Sem data. Disponível em: <<http://emaec.com.br/>>.
- Espartel, L. Curso de topografia. 6ª ed. Porto Alegre: Globo, p. 655, 1987.
- Guimarães, G. M. Avaliação da Concentração de Metais e Elementos Traço em Amostras de Sedimento do Reservatório Guarapiranga, São Paulo-SP, Brasil. INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (IPEN) - Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2011.
- Horn, B. K. P. Hill Shading and the Reflectance Map. Proceedings of the IEEE, vol. 69, no. 1, p. 14–47, 1981. Disponível em: <<http://doi.org/10.1109/PROC.1981.11918>>. Acesso em 25 out 2016.
- INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL (ISA). Guarapiranga 2005: Como e por que São Paulo está perdendo este manacial. Resultados do Diagnóstico Sociambiental participativo da bacia Hidrográfica da Guarapiranga. (M. Whately & P. M. Cunha, orgs.). São Paulo, 2006
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2016. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/politico-administrativo>>. Acesso em 20 fev 2016.
- Kleerekoper, H. Estudo Limnológico da Represa de Santo Amaro em São Paulo. São Paulo - SP, Brazil, 1939.
- Landim, P. M. B. Introdução aos Métodos de Estimção Espacial para Confecção de Mapas. (I. DGA, Ed.), Texto Didático, Brasil, 2000.
- Mitas, L., & Mitasova, H. Spatial interpolation. Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications, p. 481–492, 1999. Disponível em: <<http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/papers/hgint39.pdf>>. Acesso em 25 out 2016.
- Mozeto, A.A.; Silvério, P.F.; Soares, A. Estimates of benthic fluxes of nutrients across the sediment-water interface (Guarapiranga reservoir, São Paulo, Brazil). The Science of the Total Environment, vol. 266, p. 135-142, 2001.

Nishimura, P. Y. A comunidade fitoplanctônica nas represas Billings e Guarapiranga (Região Metropolitana de São Paulo). Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2012. Disponível em: <file:///C:/Users/comum/Downloads/Paula_Nishimura.pdf>. Acesso em 25 out 2016.

Nochi, E. K. Gestão de Mananciais: Abastecimento Público da Região Metropolitana de São Paulo. Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, Brasil, 2006.

Padial, P. R. Qualidade, heterogeneidade espacial e biodisponibilidade de metais no sedimento de um reservatório tropical urbano eutrofizado (Reservatório Guarapiranga, SP). Dissertação (Mestrado em Ecologia de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) – Instituto de Biociências da USP, São Paulo, Brasil, 2008.

Queiroz, W. de. Análise geoambiental da bacia contribuinte do reservatório guarapiranga (sp) para avaliação da produção de sedimentos. Universidade Guarulhos, Brazil, 2014.

Rakhmatullaev et al. Geostatistical approach for the assessment of the water reservoir capacity in arid regions : a case study of the Akdarya reservoir, Uzbekistan to cite this version : Environmental Earth Sciences, vol. 63, no. 3, p. 447–460, 2011. DOI: 10.1007/s12665-010-0711-3

Resck, R. P.; Neto, J. F. B.; Coelho, R. M. P. Nova batimetria e avaliação de parâmetros morfométricos da Lagoa da Pampulha (Belo Horizonte, Brasil). Geografias, vol. 03, no. 2, p. 17–23, 2007.

Sá, N. de. Cálculos de declividade no QGIS. Creative Commons Atribuição-CompartilhaIgual 4.0 Internacional. Publicado em 03 fev 2014. Disponível em: <http://narceliodesa.com/calculando-declividade-qgis/>. Acesso em 25 out 2016.

Sárközy, F. Gis functions. Periodica Polytechnica, vol. 43, no. 1, p. 87–106, 1999. Disponível em: <https://pp.bme.hu/ci/article/viewFile/667/422>. Acesso em 26 out 2016.

Shahidian et al. Hidrologia Agrícola. Shakib Shahidian; Rita Cabral Guimarães; Carlos Miranda Rodrigues (Editores). Editora Publidisa. 1º Edição, p. 243, 2012. ISBN: 978-989-97060-4-0. DOI: 353505/13. 2012.

Sternai, P., Herman, F., Fox, M. R., & Castelltort, S. (2011). Hypsometric analysis to identify spatially variable glacial erosion. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(3), 1–17.
<http://doi.org/10.1029/2010JF001823>

Sutton, T., Dassau, O., & Sutton, M. A gentle introduction to GIS: Brought to you with Quantum GIS, a Free and Open Source Software GIS Application for everyone. 2009. Disponível em: <<http://doi.org/10.1038/sj.bdj.2011.132>>. Acesso em 25 out 2016.

Vivoni et al. Hypsometric control on surface and subsurface runoff. *Water Resources Research*, vol. 44, no. 12, p. 1–9, 2008. Disponível em: <<http://doi.org/10.1029/2008WR006931>>. Acesso em 29 out 2016.

Whately, M.; Cunha, P.M. Guarapiranga 2005: Como e por que São Paulo está perdendo este manancial: Resultados do Diagnóstico Socioambiental Participativo da Bacia Hidrográfica da Guarapiranga. Instituto Socioambiental, São Paulo, p. 48, 2006.