

Levantamento da rede reservatório no semiárido brasileiro por meio de sensoriamento remoto

Cristian Epifânio de Toledo ¹

¹ Universidade Estadual de Goiás - UEG
Rua S7, S/N- 76190-000 – Palmeiras de Goiás - GO, Brasil
cristian.toledo@ueg.com

Abstract. The reservoirs are the main water source in the Brazilian semiarid region, especially in the crystalline-geology watersheds, generating a high density reservoir network. The objective of this work was mapping and evaluating the spatial distribution of the HdRN in the 25,000 km² Orós Reservoir Basin, Brazil, with the help of remote sensing tools associated with Geographic Information Systems. Using images LANDSAT 5 of the end of the rainy season of 2011 of the ORB, the remote sensing technique allowed the identification of 6,002 polygons, which corresponded to only 4,717 reservoirs (i.e., 27% misidentification). The perimeter of the reservoirs ranged from 0.250 to 560 km and the individual water surface area ranged from 0.004 to 195.0 km², with a total of 465.0 km². Analyzing the surface area of some reservoirs, results showed that the surface area estimated by remote sensing with manual adjustment of the polygons yielded values very close the on-site monitored areas, generating R² = 0.99 and Normalized Difference Index ranging from -0.02 to +0.09. The density of reservoirs in the ORB in 2011 was 0.19 reservoirs/km², higher than the optimum recommended density for the basin of 0.15 reservoirs/km². Remote sensing method used to identify the reservoirs allowed the mapping and evaluation of the surface areas of strategic reservoirs of Basin Óros Reservoir, showing great potential for monitoring, planning and management of water resources.

Palavras-chave: image processing, satellite images, geographic information systems (GIS), processamento de imagens, imagens de satélite, sistema de informação geográfica (SIG).

1. Introdução

Historicamente as políticas públicas buscaram resolver o problema de escassez hídrica somente por meio da construção de reservatórios. A política de construção de reservatórios produziu ao longo dos tempos, um grande número de reservatórios na região, denominada de Rede de Alta Densidade de Reservatórios - High-Density Reservoir Network (HdRN), tornando complexo o gerenciamento do sistema (Mamede et al., 2012).

Os reservatórios interrompem o fluxo natural do rio, mudando o ritmo e a quantidade dos fluxos de água, alterando a temperatura, o transporte de água e a distribuição de sedimento e matéria orgânica entre as paisagens (PRINGLE, 2001). Contudo, a existência de muitos reservatórios de pequeno e médio porte espalhados por grandes extensões, promovem uma distribuição mais democrática da água. Além disso, é uma opção de fonte de alimentação (pesca e pequenos cultivos de vazante), lazer e recreação. Lima Neto et al. (2011) concluíram que a retenção de sedimento é outro ponto positivo e importante da rede densa de reservatórios.

Contudo até recentemente, os modelos hidrológicos utilizados para planejar a gestão da água em bacias com uma rede densa de reservatórios ou ignorou as pequenas barragens (CAMPOS, 2010), ou considerava-os de uma forma agrupada (MUELLER et al., 2010). No entanto, o crescente interesse em verificar os impactos acumulativos da rede densa de reservatórios nos processos hidrológicos de uma bacia, ocasionou o desenvolvimento de modelos hidrológicos distribuídos, que analisam explicitamente cada reservatório da rede (MAMEDE et al., 2012). A análise hidrológica distribuída dos reservatórios gerou a necessidade de se conhecer as características de cada reservatório, bem como, a relação entre os reservatórios. Para obter essas informações, tem se utilizado o levantamento a campo e/ou por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o uso do sensoriamento remoto para gerar as informações necessárias para gerenciar sistemas complexos hidrológicos (rede densas de reservatórios - HdRN).

2. Metodologia de Trabalho

A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do Açude Orós - BHAO, aninhado na bacia do Alto Jaguaribe, correspondendo a 97% da sua área de superfície. A bacia está localizada na porção sudoeste do Ceará, Brasil. Tem uma área de drenagem de 24.639 km², o que corresponde a 17% do território do Estado (Figura 1). O principal rio é o Jaguaribe, que tem sua nascente no município de Tauá, com calha de fluvial de 370 km até açude Orós, e uma extensão total de 610 km, até sua foz, no Oceano Atlântico.

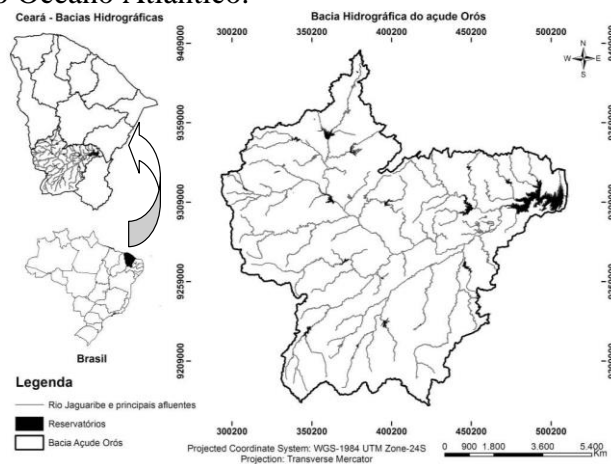


Figura 1. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Açude Orós. Na caixa maior, os principais reservatórios da bacia hidrográfica são apresentados.

A quantificação e a espacialização dos reservatórios existente na bacia foram realizadas com base em imagens de satélite. Essas imagens foram obtidas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2011a) e o satélite utilizado foi o LANDSAT 5 - TM (Thematic Mapper) com 30 m de resolução espacial. A data da imagem digitalizada foi selecionada de acordo com a visibilidade da área, de modo a cobrir as órbitas 217 e 218, e os pontos 64 e 65, entre julho e agosto de 2011. Vale ressaltar que esse período corresponde ao final do período chuvoso da região. Com isso, tentou-se garantir que o espelho d'água dos reservatórios levantados estivesse o mais próximo possível da área hidráulica máxima.

Após a aquisição das imagens formadas por sete bandas cada, foram selecionadas três bandas, a infravermelho médio (banda 5), a infravermelho próximo (banda 4) e a vermelha (banda 3) do espectro eletromagnético. Essas três bandas foram combinadas na composição RGB (Red, Green e Blue) utilizando o software Envi 4.2, possibilitando expor claramente os limites entre o solo, a vegetação e a água, conforme Fitz (2008) e INPE (2011b).

O processamento das imagens RGB foi iniciado com a criação de um mosaico das imagens que cobriam a área da bacia. Posteriormente, foi realizada a classificação supervisionada do mosaico. Na classificação, foi empregado o método da Máxima Verossimilhança (Maximum Likelihood) obtendo-se apenas a delimitação dos corpos hídricos (espelho d'água), sendo desprezados os demais elementos da paisagem. Os espelhos d'água vetorizados foram, então, exportados para o software ArcGis 9.3, no qual se realizou a transformação desses em polígonos e, posteriormente, se procedeu a um refinamento manual dos polígonos. Este refinamento contou com a confirmação ou exclusão de falsos polígonos, além do ajuste no tamanho da área superficial levantada.

Este refinamento foi necessário por causa de dois problemas detectados durante a classificação. O primeiro refere-se à presença de nuvem e sombra na imagem, o que pode gerar falsos polígonos classificados como corpos d'água. O segundo problema está ligado à resolução espacial da imagem, o que pode dificultar a associação dos pixels que compõem o contorno do reservatório a uma determinada categoria (RODRIGUES et al., 2007). Com os polígonos

editados adequadamente suas áreas superficiais, essas áreas foram analisadas utilizando-se as ferramentas de X-Tools Pro.

Para verificar a eficiência da metodologia utilizada no levantamento dos reservatórios, as áreas superficiais levantadas (ASL) dos reservatórios estratégicos (Tabela 3) foram comparadas com suas respectivas áreas superficiais monitoradas (ASM). Os reservatórios estratégicos são monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH) e suas áreas superficiais foram obtidas na mesma data das imagens utilizadas para o sensoriamento remoto.

Tabela 1 - Informações levantadas no banco dados da Secretária dos Recursos Hídricos (SRH/CE) dos 18 reservatórios estratégicos monitorados pela COGERH

Açudes	Coordenadas ¹ (m)		Município	Área ² (km ²)	Bacia Hidráulica (km ²)	Capacidade (hm ³)
	E	N				
Arneiroz II	365223	9307089	Arneiroz	5408	23,3	197,0
Benguê	374680	9270285	Aiuaba	933	3,47	19,5
Canoas	396118	9232034	Assaré	552	6,60	69,2
Do Coronel	394649	9258894	Saboeiro	26	0,65	1,7
Faé	475922	9319162	Quixelô	317	3,09	24,4
Favelas	375445	9338420	Tauá	665	6,78	30,1
Forquilha II	376061	9378494	Tauá	45	0,83	3,4
Muquém	449493	9260965	Cariús	297	4,93	47,6
Orós	508313	9310493	Orós	24912	202,11	1940,0
Parambu	310564	9314132	Parambu	113	1,59	8,5
Pau Preto	380326	9217176	Potengi	378	0,82	1,7
Poço da Pedra	350253	9228023	Campos Sales	944	8,32	52,0
Quincoé	450514	9327187	Acopiara	168	1,24	7,1
Rivaldo de Carvalho	396726	9306716	Catarina	306	2,72	19,5
Trici	343313	9345953	Tauá	552	4,27	16,5
Trussu	452040	9302858	Iguatu	1566	55,09	301,0
Valério	419582	9229787	Altaneira	60	0,26	2,0
Várzea do Boi	361051	9346694	Tauá	1245	10,40	51,9

1Coordenadas em UTM, Datum WGS 1984, Zona 24 S. 2Área da bacia hidrográfica do reservatório.

O desempenho do método foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2) e pelo “Índice da Diferença Normalizada das Áreas” (Normalized Difference Area Index – NDAI, Equação 1 - LIEBE (2002); RODRIGUES et al., 2007).

$$NDAI = \frac{(ASM - ASL)}{(ASM + ASL)} \quad (1)$$

Na Equação 1, NDAI é o Índice da Diferença Normalizada das Áreas, ASM é a área de superfície monitorada (medida), e ASL é a área levantada do reservatório por sensoriamento remoto.

3. Resultados e discussão

A combinação das bandas 05:04:03 (RGB) mostrou que a classe de solo tem cores claras tendendo para o branco, a classe de água apresenta sempre a ausência de cor (preto) e a classe de vegetação aparece em tons de verde e rosa (Figura 2.A). No entanto, o verde escuro foi sempre observado, juntamente com a presença de água, sendo atribuída a esta cor verde escura a subclasse das macrófitas.



(A) Imagem combinada (RGB)
Combinação das bandas 05:04:03 (RGB), mostrando a diferença espectral das classes de solo nu (branco), água (preto) e vegetação (verde e rosa).

(B) Classificação dos polígonos
Classificação automática dos polígonos, evidenciando a divisão de um reservatório em mais de um polígono devido à presença de macrófitas (verde escuro).

(C) Ajuste do polígono
Ajuste manual feita em polígonos-reservatórios, tendo em conta a presença de macrófitas nos reservatórios.

Figura 2. Procedimento adotado na classificação dos espelhos d'água, destacando o ajuste da área superficial dos polígonos devido a presença de macrófitas.

Durante a classificação de imagens, a presença de macrófitas causou frequentemente a divisão da área superficial em mais de um polígono, além de alterar o verdadeiro valor da área superficial dos lagos levantados. No entanto, este problema não pode ser resolvido só com o processo de classificação automática, exigindo um ajuste manual dos polígonos-reservatórios. O ajuste manual foi realizado analisando polígono por polígono, utilizando a própria imagem de satélite em RGB e o auxílio da imagem do Google Earth para confirmá-los. Os polígonos identificados como falsos reservatórios devido às macrófitas foram unidos ao polígono principal representante do reservatório alvo, sendo, por fim, realizada a adequação da área superficial do lago (Figura 2. B e C).

Além de ajuste (união e adequação dos polígonos), alguns dos polígonos identificados na classificação também foram excluídos por serem, na verdade, sombras de nuvens e do relevo, devido à posição do sol em relação a terra no momento da passagem do satélite LandSat 5. O erro de identificação de sombras como massas de água é devido à assinatura espectral dos alvos (sombras e corpos d'água) serem muito semelhantes. Sendo observado um valor igual a 0 no RGB dos pixels de ambos alvos (Figura 3), fato esse também verificado por Chen (2001).



Figura 3. Imagem com a identificação de um reservatório e de uma sombra de uma nuvem. Em destaque, estão as análises dos valores de RGB de cada cena, demonstrando serem idênticos

As sombras e os corpos d'água são caracterizados pela ausência de cor nos seus pixels, dificultando, assim, sua separação em classes diferentes na classificação automática. Tronando o refinamento manual imprescindível, principalmente devido às sombras topográficas, geradas pelo ângulo de incidência entre o pulso de energia (fonte da radiação, no caso o sol) e a linha perpendicular à superfície da Terra (alvo). Muitos autores na literatura comentam o problema de sombras de nuvens e topográficas no sensoriamento remoto de estudos ambientais, como

Tseng et al. (2008), Wang et al., (2009), entre outros, confirmando a importância do aperfeiçoamento da técnica de levantamento de corpos d'água por sensoriamento remoto.

No processo de classificação automática, 6.002 polígonos (potenciais reservatórios) foram, inicialmente, registrados, ao passo que, após a edição manual, o número de polígonos-reservatório foi 4.717 (Figura 4). Malveira et al. (2012), por meio de mapas e trabalhos de campo para avaliar o número de reservatórios também na BHAO, registraram 2.174 e 4.014 reservatórios nos anos de 1970 e 2002, respectivamente, projetando 4.800 reservatórios para 2010, valor este próximo do levantado neste trabalho em 2011.

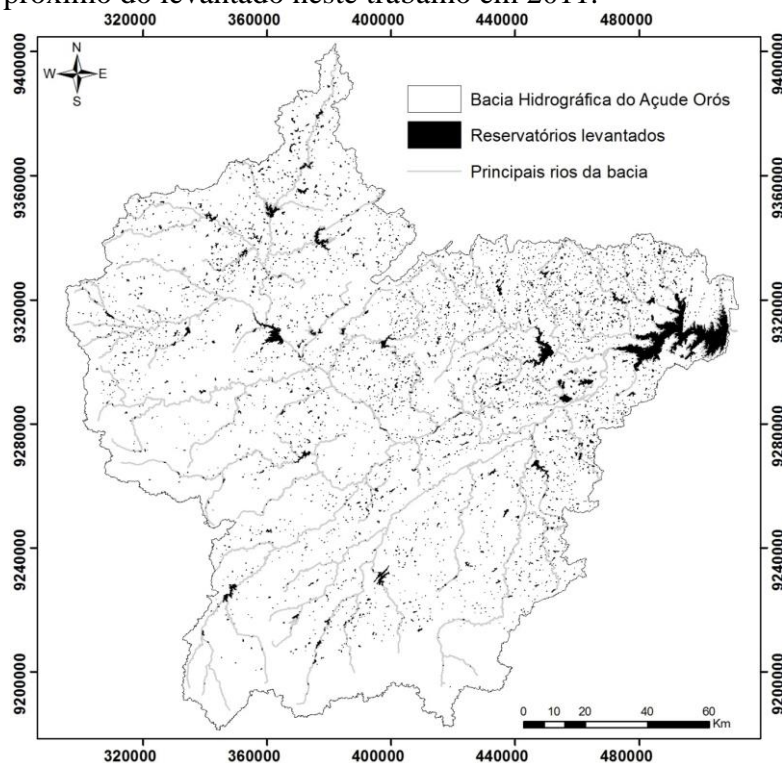


Figura 4. Distribuição espacial de 4.717 reservatórios identificados na bacia do açude Orós, em 2011

Deste modo, os resultados desta tese mostraram um aumento de 17,5% no número de reservatório na BHAO entre 2002 e 2011, ou seja, um aumento de 1,81% anualmente. Esse índice é inferior à taxa de incremento médio observado entre 1970 e 2002, que foi de 2,64% por ano (MALVEIRA et al., 2012). A desaceleração na construção de reservatórios, na última década, pode estar relacionada ao programa do Governo Brasileiro que, em 2003, estimulou a construção de mais de um milhão de cisternas de cimento para a população rural difusa do semiárido (ARAÚJO et al., 2005) e ao esgotamento dos locais tecnicamente adequados para a construção de novos reservatórios, que dependem, principalmente, do relevo, do solo, da geologia, da bacia de drenagem e da precipitação.

O sensoriamento remoto forneceu ainda alguns dados relevantes para a comunidade no entorno dos reservatórios e para os gestores de água. Por exemplo, o perímetro dos reservatórios variou 0,250-560 km, com total de 5414 km. O perímetro dos lagos no semiárido é importante devido ao sistema de cultivo de "vazante", em que os agricultores usam as terras úmidas localizadas no entorno dos lagos para cultivos em pequena escala, principalmente para a subsistência. Outro dado relevante, é a área do espelho d'água ou área hidráulica, que variou de 0,004 - 195,0 km², com total de 465,0 km² (cerca de 2% da área total da bacia). A área do espelho d'água é importante para avaliar as perdas por evaporação, que, no semiárido brasileiro, é da ordem de 25 - 50% da água dos reservatório (CAMPOS, 2010; ARAÚJO et al., 2006).

Analisando a distribuição de frequência da área do espelho d'água dos reservatórios levantados (Figura 5), pode-se notar que as áreas pequenas estão associadas com as altas frequências de ocorrência. As áreas de espelho menores que 0,5 km² representam 99% dos reservatórios identificados, demonstrando que a maioria dos reservatórios que compõe a rede densa de reservatório BHAO é formada por pequeno lagos. Alexandre (2012), pesquisando nos estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará, constatou a associação de pequenas barragens com o uso familiar, indicando que a maior parte dos reservatórios no semiárido, são de uso de pequenas famílias ou pequenas comunidades rurais difusas.

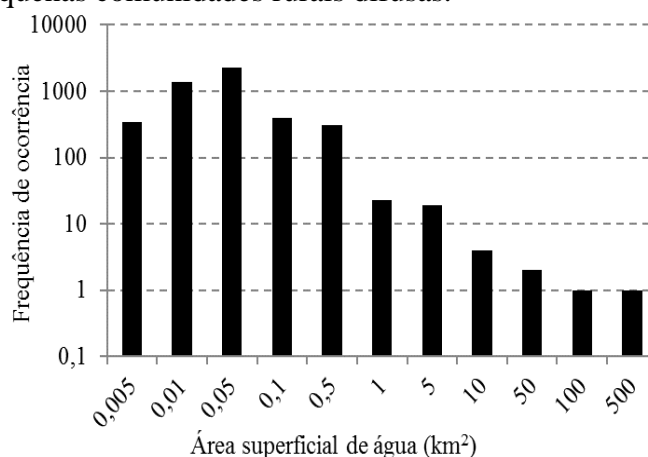


Figura 5. Distribuição da frequência da área do espelho d'água máxima dos reservatórios levantados na bacia hidrográfica do açude Orós

Na avaliação do desempenho do método, a correlação entre as áreas do espelho d'água ou superficiais monitoradas (ASM) e levantadas por sensoriamento remoto (ASL) apresentou um bom ajuste, $R^2 = 0,99$ (Figura 6). Outros autores, como Liebe (2002), que estudou uma bacia no semiárido de Gana e Rodrigues et al. (2007), uma bacia no Cerrado Brasileiro, também obtiveram boa correlação entre áreas superficiais medidas e avaliadas por imagens de satélite, encontrando R^2 igual a 0,88 e 0,92, respectivamente. Esses resultados demonstram o bom desempenho no levantamento da superfície de água dos reservatórios utilizando imagens de satélite com resolução de até 30 metros e ferramentas de geoprocessamento.

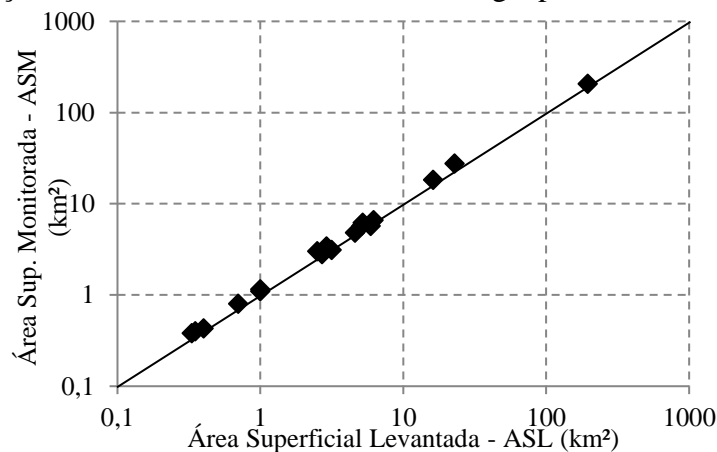


Figura 6. Relação entre área superficial de água calculada a partir de imagem de satélite LANDSAT 5 (S'L) e área monitorada (S'M) dos reservatórios estratégicos da bacia.

A alta correlação entre S'M com a S'L encontrada neste trabalho é atribuída principalmente ao refinamento manual. Apesar de trabalhosa, a edição manual permitiu a correção e ajuste de eventuais erros graves, tanto para avaliar o número dos reservatórios como para estimar a área da superfície dos lagos. O outro índice analisado para verificar a eficiência da metodologia adotada, o NDAI variou de -0,02 a 0,09 (Figura 7), demonstrando novamente

a qualidade do método (sensoriamento remoto com edição manual) utilizado para estimar a área superficial de água dos reservatórios estratégicos da BHAO.

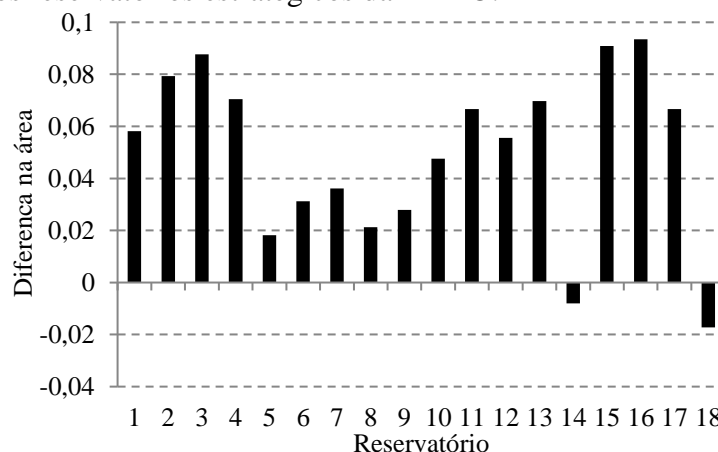


Figura 7. Índice da Diferença Normalizada das Áreas (NDAI) estimada para as áreas superficiais de água monitorada (ASM) e levantada (ASL), indicando a qualidade do ajuste do sensoriamento remoto realizado

Dos 18 reservatórios analisados, apenas dois apresentaram valores negativos de NDAI, ou seja, a ASL foi superestimada de 1 a 2%. Nos restantes reservatórios, houve uma ligeira tendência em subestimar a área superficial dos reservatórios, mas o erro observado não ultrapassou 10%. O melhor resultado foi obtido no levantamento do reservatório Rivaldo de Carvalho (menos 1% de erro). Por outro lado, o pior desempenho foi do reservatório Trussu, que subestimou em 9% a área superficial efetiva do reservatório.

4. Conclusões

O método de sensoriamento remoto usado para identificação dos reservatórios permitiu o mapeamento e a avaliação das áreas de superfície dos reservatórios estratégicos da Bacia Hidrográfica do Açude Óros, mostrando grande potencial para monitoramento, planejamento e gestão dos recursos hídricos. Contudo, observou-se duas falhas no processo, o erro de interpretação de sombras como reservatório e a não identificação da superfície da água real devido à presença de macrófitas nos reservatórios eutrofizados, os quais, foram reduzidos ajustando-se manualmente os polígonos gerados no sensoriamento remoto.

Com base nas observações da rede de reservatórios feitas na Bacia Hidrográfica do Açude Óros, a bacia mostrou uma redução na taxa de incremento anual de reservatórios, na última década, em comparação com décadas anteriores. Isso, possivelmente, ocorreu devido ao aumento da oferta de água por outros sistemas, como cisternas, e/ou pelo esgotamento de locais tecnicamente adequados para construção de novos reservatórios.

Agradecimentos

Agradecemos a Universidade Estadual de Goiás – UEG pelo apoio oferecido aos membros da pesquisa para participar do evento e ao CNPq pelo apoio financeiro durante os estudos.

Referências Bibliográficas

ALEXANDRE, D.M.B. **Gestão de pequenos sistemas hídricos no Semiárido nordestino**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

ARAÚJO, J.C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 1, p.157-170, 2006.

ARAÚJO, J.C.; BRONSTERT, A.; GÜNTNER, A. Influence of reservoir sedimentation on water yield in the semiarid region of Brazil. **VII IAHS Scientific Assembly**, Foz do Iguaçu. Wallingford: v. 2, p. 301-307. 2005.

CAMPOS, J.N. Modeling the yield evaporation spill in the reservoir storage process: The regulation triangle diagram. **Water Resources Management**, 24(13), p.3487-3511, 2010.

CHEN, P. **An improved cloud detection algorithm for monitoring agricultural growing conditions with NOAA AVHRR in Texas**. Tese de doutorado, Texas A&M University. 2001.

FITZ, P.R. **Geoprocessamento sem Complicação**. Ed. Oficina de Textos. 2008. 160p.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Catalago de imagens**. 2011a. Disponível em:<<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso: maio.2013.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagens LANDSAT TM e ETM**. 2011b. Disponível em:<http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/ATUS_LandSat.php>. Acesso: jun. 2013.

LIEBE, J. **Estimation of water storage capacity and evaporation losses of small reservoirs in the Upper East Region of Ghana**. Dissertação (Tese), Departamento de Geografia, Universidade def Bonn, Bonn, 2002. p. 113.

LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M.; ARAÚJO, J. C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal**, v. 56, n. 2, p. 319-333, 2011.

MALVEIRA, V. T. C.; ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A. Hydrological Impact of a High-Density Reservoir Network in the Semiarid North-Eastern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n.1, p. 109-117, 2012.

MAMEDE, G.L., ARAÚJO, N.A.M., SCHNEIDER, C.M., ARAÚJO, J.C., HERRMANN, H.J. Overspill avalanching in a dense reservoir network. Proceedings of the National **Academy of Sciences of the United States of America**, v.109, n.19, p.7191-7195, 2012.

MÜLLER, E. N.; WAINWRIGHT, J.; PARSONS, A. J. Impact of connectivity on the modeling of overland flow within semiarid shrubland environments. **Water Resources Research**, v. 43, 2007.

PRINGLE, C. M. Hydrologic Connectivity and the Management of Biological Reserves: a Global Perspective. **Ecological Applications**, v. 11, n. 4, p. 981-998. 2001.

RODRIGUES, L. N.; SANO, E. E.; AZEVEDO, J. A.; SILVA, E. M. Distribuição espacial e área máxima do espelho d'água de pequenas barragens de terra na bacia do Rio Preto. **Espaço & Geografia**, v. 10, n. 2, p.379-400. 2007.

TSENG, D.C., TSENG, H.T.; CHIEN, C.L. Automatic cloud removal from multi-temporal SPOT images. **Applied Mathematics and Computation**, v. 205, p. 584-600, 2008.

WANG, K; FRANKLIN, S. E.; GUO, G.; HE, Y; MCDERMID, G. J. Problems in remote sensing of landscapes and habitats. **Progress in Physical Geography OnlineFirst**, v. 14, p 1-22, 2009.