

**Sensoriamento Remoto e Geoestatística aplicados à estimativa de batimetria em reservatórios do Setor Elétrico Brasileiro.**

*Fábio de Souza Pereira Borges*<sup>1</sup>

*Otto Corrêa Rotunno Filho*<sup>2</sup>

*Geraldo Wilson-Jr*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Exército Brasileiro / Instituto Militar de Engenharia – IME, Departamento de Engenharia de Construção, Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro / RJ – 22290 270, Brasil. fabiospb@ibest.com.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – COPPE / UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Bloco I, sala I-106, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro / RJ – 21945 970, Brasil. otto@hidro.ufrj.br

<sup>3</sup> Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – COPPE / UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica, Centro de Tecnologia, Bloco C, sala C-203, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro / RJ – 21945 970, Brasil. gwj@peno.coppe.ufrj.br

**Abstract:** More than 90% of the electric energy consumed in Brazil comes from its water resources. For this, it is necessary to rigorously evaluate sedimentation in Brazilian reservoirs, mainly because the sediments cause the reduction in storage capacity, provide conditions to upstream flooding problems and allow aquatic plants growth that affects water quality standards. The present work intends to evaluate the bathymetry spatial distribution within a reservoir through satellite imagery and a geoestatistical approach.

Under this framework, the present work develops a methodology to estimate bathymetry using one IKONOS image and the Bayesian kriging geostatistical model. The results showed that the methodology presents potential to be applied in evaluating and in monitoring reservoir sedimentation, mainly due to allowing the implementation of a database temporally consistent and to requiring a reduced data point density for calibration.

**Palavras-chave:** remote sensing, geoestatistical analysis, bayesian kriging model, reservoir bathymetry, sensoriamento remoto, análise geoestatística, modelo geoestatístico de krigagem bayesiana, batimetria de reservatórios.

## 1 - Introdução

A idéia antiga de abundância dos recursos hídricos passada entre as gerações está sendo reestruturada a fim de inibir o desperdício e a destruição dos mananciais. Segundo a UNESCO (1997, apud Setti et al., 2002), a população mundial e suas atividades antrópicas já atingiram uma escala de utilização dos recursos naturais disponíveis que obriga a todos a pensar no futuro de uma nova forma.

O Brasil tem uma disponibilidade hídrica *per capita* privilegiada, cerca de 36.580 m<sup>3</sup>/hab.ano. Porém, mais de 73% da água doce disponível no país encontram-se na bacia Amazônica, que é habitada por menos de 5% da população. Portanto, apenas 27% dos recursos hídricos brasileiros estão disponíveis para 95% da população (Setti et al., 2002). Além do abastecimento humano e animal, entre os diversos usos múltiplos da água no Brasil, destaca-se o seu consumo na geração de energia elétrica. Segundo Carvalho et al. (2000), atualmente, mais de 90% da energia elétrica consumida no Brasil provêm de fontes hidráulicas e o seu papel de destaque deverá se manter ao longo das próximas três ou quatro décadas.

Nesse contexto, o estudo sedimentológico é particularmente importante para o Brasil. As barragens geram uma redução das velocidades da corrente. Provocam a deposição gradual dos sedimentos carregados pelo curso de água e conseqüente assoreamento, diminuindo a capacidade de armazenamento dos reservatórios e podendo inviabilizar a operação de aproveitamentos hidrelétricos, além de ocasionar problemas ambientais de diversas naturezas (ICOLD, 1989). Carvalho et al. (2000) observam que alguns processos de assoreamento são mais velozes que o previsto e que a vida útil média dos reservatórios existentes em todos os países no mundo decresceu de 100 para 22 anos nos últimos 50 anos, sendo 6 bilhões de dólares anuais o custo para promover a remoção dos volumes assoreados.

Neste enfoque, o presente estudo trata do desenvolvimento de uma metodologia que permita avaliar e monitorar o processo de assoreamento em reservatórios, lagos, lagoas e rios, com economia, velocidade e confiabilidade, utilizando informações de sensoriamento remoto processadas pelo método geoestatístico de krigagem Bayesiana.

Para cumprir esse objetivo, estuda-se o reservatório Morro Grande (**Figura 1**), com 723.206,31 m<sup>2</sup> de área superficial, abrangendo aproximadamente 6,5 km de comprimento médio por 0,25 km de largura média, localizado no exutório da bacia hidrográfica do rio Preto (1.100 km<sup>2</sup>), no município de Areal/RJ, partindo-se de uma campanha batimétrica realizada pela Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro – CERJ, operadora do reservatório, em março de 2000 e de uma imagem IKONOS, adquirida em junho de 2002.

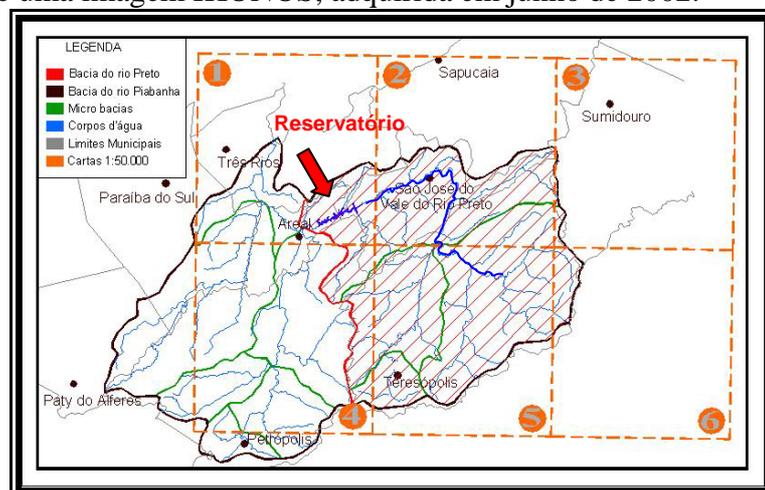


Figura 1: Mapa da bacia hidrográfica do rio Preto.

## 2 - Fundamentação Teórica

### 2.1 - Assoreamento de Reservatórios

Os processos sedimentológicos podem ser complexos. Parte dos sedimentos produzidos pelos processos erosivos na bacia de contribuição ao reservatório é transportada e dispersa pelo sistema fluvial e, devido à redução de velocidade da água, os sedimentos depositam-se quando chegam ao reservatório. A **Figura 2** ilustra o problema na área do reservatório Morro Grande.



**Figura 2: Sequências de fotos mostrando diversas ocorrências de erosões nas margens do reservatório Morro Grande (08/02/2004).**

A barragem constitui um impedimento à passagem da maior parte das partículas para jusante, o que pode ocorrer com o escoamento pelo vertedouro e pelos condutos. À medida que o assoreamento cresce, a capacidade de armazenamento do reservatório diminui, a influência do remanso aumenta para montante, as velocidades no lago aumentam no período chuvoso e uma maior quantidade de sedimentos passa a escoar para jusante, diminuindo a eficiência de retenção das partículas. Durante os períodos de depleção os cursos de água meandram-se no interior do reservatório. Os sedimentos que se depositam devido à influência do reservatório estendem-se para montante e no interior do reservatório, não se distribuindo uniformemente mesmo dentro do lago (Mahmood, 1987; Carvalho et al. 2000).

### 2.2 - Geoestatística

A geoestatística foi utilizada, inicialmente, na solução de problemas de geologia e mineração. Abrange a utilização de técnicas específicas, desenvolvidas na Escola de Minas de Paris, Matheron (1962-1963). Para tanto, este autor foi bastante auxiliado pelos trabalhos estatísticos da escola sul-africana realizados em minas de ouro e urânio, que forneceram uma gama extensa de conhecimentos experimentais.

A geoestatística está baseada na teoria das variáveis regionalizadas (Journel e Huijbregts, 1993) que constituem uma função definida em um domínio do espaço. São variáveis em que os valores estão relacionados, de alguma maneira, com a posição que ocupam no espaço.

Um fenômeno natural pode ser frequentemente caracterizado pela distribuição espacial de uma ou mais variáveis, chamadas variáveis regionalizadas. A teoria geoestatística é baseada no fato de que a variabilidade de todas as variáveis regionalizadas tem uma estrutura particular. Se  $z(X)$  é o valor da variável aleatória  $Z(X)$  no ponto  $X$ , o problema é representar a variabilidade da função  $Z(X)$  no espaço, quando  $X$  varia. Essa representação será usada para resolver alguns problemas como a estimativa do valor  $z(X_0)$  no ponto  $X_0$  onde não há dados disponíveis, ou estimar a proporção de valores  $z(X)$ , em uma dada área, que são maiores que um determinado limite.

A solução geoestatística consiste em interpretar cada valor  $z(X_i)$  como uma realização particular da variável aleatória  $Z(X_i)$  no ponto  $X_i$ . O conjunto dessas variáveis aleatórias

autocorrelacionadas em um domínio  $D$ , constitui uma função aleatória. O problema de caracterizar a variabilidade espacial de  $z(X)$  é, então, reduzido a caracterizar as correlações entre as várias variáveis aleatórias  $Z(X_i), Z(X_j)$  que constituem a função aleatória  $\{Z(X_i), X \in D\}$ .

Exemplos de variável regionalizada são a precipitação pluviométrica, a temperatura ambiental numa região de um país e sua densidade populacional. Neste trabalho, será a profundidade de um reservatório.

### 3 - Metodologia

Nesta pesquisa, a abordagem metodológica adota o modelo geoestatístico de krigagem Bayesiana para integrar dados batimétricos pontuais coletados no campo com informações digitais de sensoriamento remoto.

Os dados de campo foram extraídos de um levantamento batimétrico realizado pela operadora do reservatório Morro Grande, nos dias 25/02 e 23/03 do ano 2000, e as informações digitais de uma imagem orbital IKONOS de 14/06 do ano 2002, com resolução espacial de um metro. Para utilizar os dados disponíveis, é assumida a hipótese de que a estrutura espacial dos dados batimétricos manteve-se estável, durante os dois anos de defasagem, ou melhor, se houve alterações, estas foram constantes e apenas na cota  $z$ . O levantamento batimétrico realizado por CERJ (2000), após análise de compatibilidade com a informação pesquisada, disponibilizou 479 pontos dos 587 pontos iniciais.

As informações foram compatibilizadas dentro de um mesmo sistema de referência. Para tanto, transformaram-se os dados originais da imagem IKONOS, realizando-se a troca do datum WGS 84 pelo SAD 69, idêntico ao utilizado no levantamento batimétrico de 2000.

Tendo em vista que o presente trabalho propunha-se a estudar apenas a área do reservatório Morro Grande, realizou-se um procedimento computacional para isolar o lago do resto da imagem (**Figura 3**). O reservatório isolado identificou apenas as regiões em que os alvos investigados estavam descobertos, ou seja, as áreas onde as ondas eletromagnéticas atingem o seu fundo e serviu como referência para extração das informações digitais.

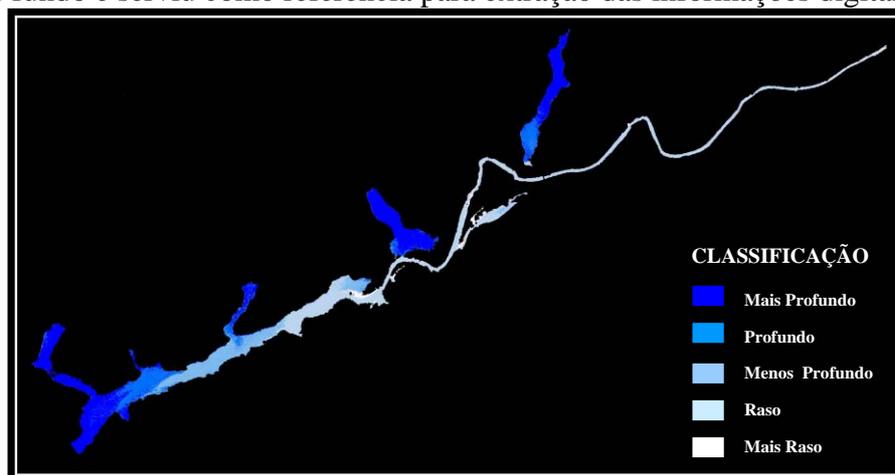


Figura 3: Reservatório isolado e classificado.

Para este objetivo, primeiramente, a imagem (4 bandas) foi classificada pelo método da máxima verossimilhança em 15 (quinze) classes distintas, sendo 9 (nove) destas classes definidas dentro do corpo hídrico, inclusive abrangendo as áreas inadequadas à investigação, como as encobertas por sombra e vegetação, apresentadas na **Figura 4**. O coeficiente kappa da classificação realizada foi de 0,76, para as áreas de treinamento empregadas na fase de calibração, enquanto que atingiu o valor de 0,65 com o conjunto de áreas de treinamento para validação.



Figura 4: Áreas inadequadas à investigação sobre o reservatório Morro Grande (08/01/2004).

Durante o estudo, dos dados compatibilizados foram selecionadas quatro amostras para calibração e validação do modelo: 10 e 469, 60 e 419, 142 e 337, e 200 e 279, respectivamente.

Por meio de uma avaliação da correlação estatística entre as informações digitais e os dados batimétricos, a banda espectral 3 (vermelho) apresentou o melhor resultado. Algumas combinações espectrais, com formas análogas ao índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), também foram testadas, tendo a combinação espectral entre as bandas 3 e 2 (verde), denominada CE 3-2, alcançado a maior correlação estatística com a profundidade amostrada.

Através de uma análise de regressão estatística, a partir dos dados disponíveis, é conduzido um processo de modelagem para estimar a profundidade em função da informação digital. Uma vez construída essa relação, adotou-se o referencial geoestatístico para análise e avaliação das estruturas de correlações espaciais presentes nos dados através da construção de semivariogramas e covariogramas. Cumprida esta etapa, foi empregado o método de krigagem Bayesiana para estimativa dos campos espaciais batimétricos. Esses campos foram comparados com aqueles gerados pelas equações de regressão estatística.

No presente trabalho, a escala de 25 metros foi utilizada para o estudo da modelagem da estrutura espacial das informações conjuntamente com a consideração de isotropia para caracterização dos dados pesquisados. Esta modelagem foi realizada através de semivariogramas omnidirecionais ajustados pelo modelo teórico Gaussiano. Os cálculos desses variogramas foram realizados pelo pacote geoestatístico *geoR* (Ribeiro Jr. e Diggle, 2003).

#### 4 - Resultados

Inicialmente, ilustra-se a sobreposição dos pontos batimétricos na imagem IKONOS (**Figura 5**), procedimento que foi empregado para relacionar as informações pontuais batimétricas e os dados digitais de natureza espacial do sensoriamento remoto.



Figura 5: Imagem IKONOS com detalhe das medições sobre eixos longitudinais e transversais (pontos vermelhos).

Entre os diversos resultados obtidos, neste trabalho, destacam-se os seguintes:

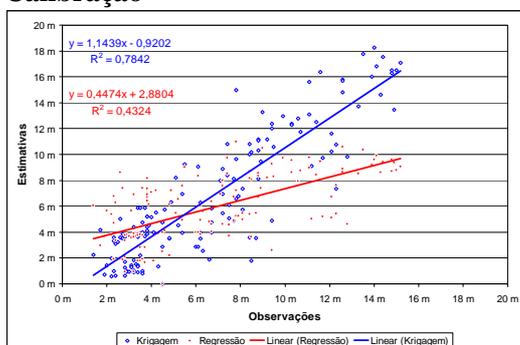
- 1) análise de regressão estatística entre dados batimétricos e números digitais das bandas que compõem a imagem IKONOS (**Tabela 1**);
- 2) as comparações entre as estimativas batimétricas feitas pela krigagem Bayesiana e pela regressão estatística utilizando as amostras com 142 pontos de calibração, para a CE 3-2 (**Figura 6**);
- 3) os mapas das estimativas batimétricas (**Figura 7**) e de suas variâncias (**Figura 8**) gerados pelo modelo geoestatístico para a amostra de 142 pontos de calibração e as informações digitais da CE 3-2.

**Tabela 1: Correlação entre os dados disponíveis.**

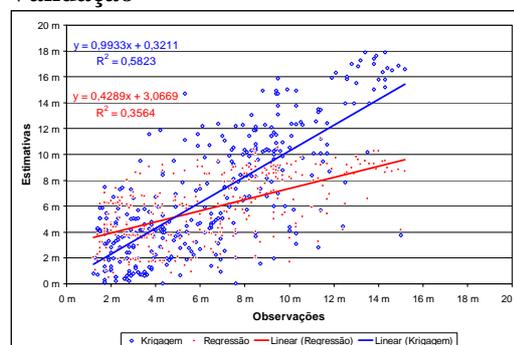
CORRELAÇÕES					
Bandas Espectrais (BD) x Profundidade (prof)					
Reservatório Isolado (c/ exclusões)					
	<i>Prof</i>	<i>BD1</i>	<i>BD2</i>	<i>BD3</i>	<i>BD4</i>
<i>Prof</i>	1				
<i>BD1</i>	-0,3025	1			
<i>BD2</i>	-0,3206	0,9555	1		
<i>BD3</i>	-0,4772	0,8714	0,8782	1	
<i>BD4</i>	-0,4080	0,2742	0,3141	0,5460	1
<i>CE 3-2</i>	-0,5545				

Os resultados mostram que há uma correlação entre as informações digitais e as batimétricas. Note-se que a abordagem de krigagem Bayesiana utiliza a equação de regressão, construída a partir da **Tabela 1**, para proporcionar as estimativas *a priori* ou iniciais.

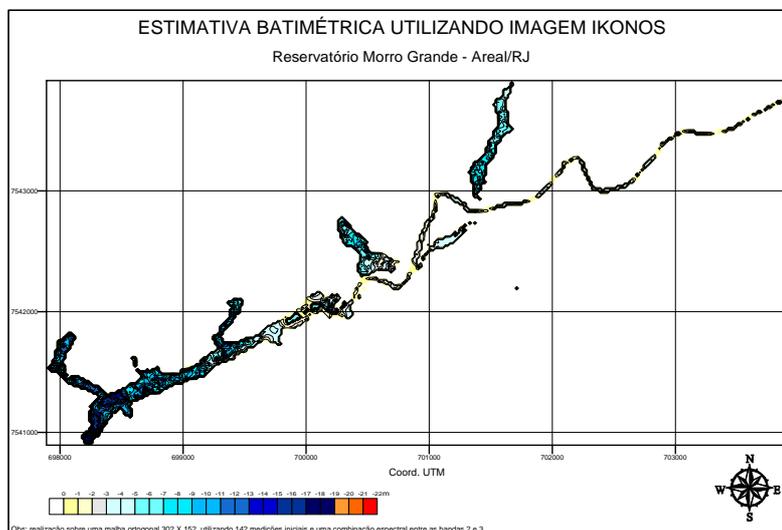
#### Calibração



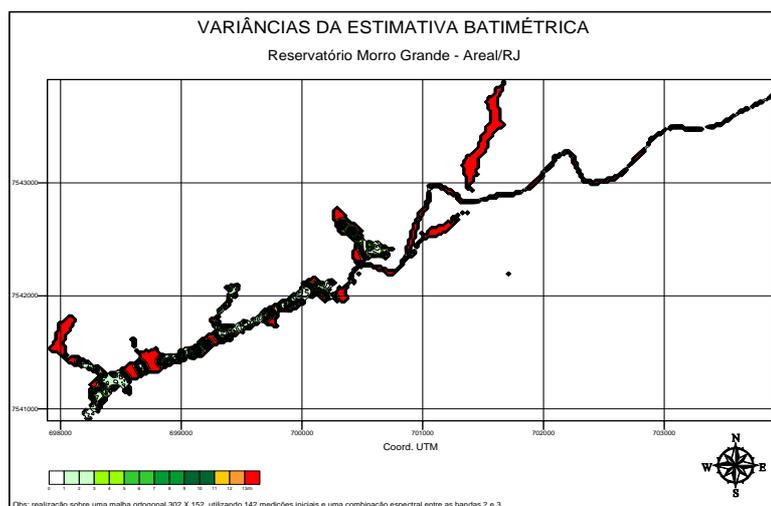
#### Validação



**Figura 6: Comparações entre as estimativas batimétricas nos pontos de calibração e validação para a CE 3-2.**



**Figura 7: Mapa batimétrico gerado pela metodologia desenvolvida.**



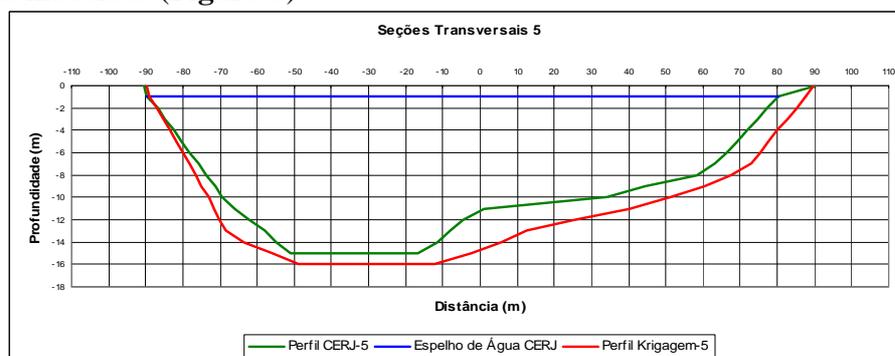
**Figura 8:** Mapa das variâncias das estimativas batimétricas gerado pela metodologia desenvolvida.

A partir da estrutura de correlação espacial dos dados batimétricos e da imagem de satélite IKONOS, são produzidas estimativas batimétricas *a posteriori* pelo método geoestatístico adotado. Observando os resultados (**Figuras 6 e 7**), percebe-se que a krigagem Bayesiana agregou informações importantes na estimativa dos valores batimétricos, melhorando, consideravelmente, os resultados alcançados inicialmente pelas funções de regressão. No mapa de variâncias da estimativa batimétrica (**Figura 8**), é importante destacar que as áreas com maior variância indicam os locais potenciais para novas amostragens, a fim de minimizar as imprecisões.

Repare-se que, neste trabalho, optou-se por apresentar somente os resultados obtidos com o emprego da amostra de calibração com 142 pontos batimétricos. Vale resaltar que o estudo mais amplo contemplou a análise de cenários com diferentes amostragens do reservatório para avaliar a robustez da metodologia utilizada para captar a variabilidade espacial da batimetria. De forma geral, cabe salientar:

- as amostras maiores sem representatividade espacial conduziram a estimativas menos precisas em áreas maiores e mais concentradas; e
- as amostras menores com maior representatividade espacial conduziram a estimativas mais precisas com áreas de imprecisão menores e mais distribuídas;

Para avaliação do campo batimétrico modelado foram medidas e comparadas 40 seções transversais com espaçamento de 50 metros entre si, à montante da barragem, tanto para a superfície tridimensional realizada pela batimetria levantada, quanto para aquela realizada pela batimetria modelada (**Figura 9**).



**Figura 9:** Comparação entre as seções transversais provenientes dos dados originais e modelados, medidas a 300 metros da barragem.

## 5 - Conclusões

O principal objetivo desta pesquisa é fomentar o uso do sensoriamento remoto como uma ferramenta para o estudo do assoreamento de reservatórios por meio de uma metodologia que promova a interação entre informações espaciais e pontuais. Enfatiza-se que a metodologia agrega as técnicas de sensoriamento remoto e do modelo geoestatístico de krigagem Bayesiana, a fim de introduzir uma nova abordagem para o estudo do assoreamento de reservatórios.

A imagem IKONOS demonstrou muita afinidade com a informação batimétrica. As informações derivadas por ela mostraram potencialidades para o estudo do assoreamento em reservatórios.

O emprego da krigagem Bayesiana foi importante, pois, além da sua formulação permitir a interação entre dados espaciais e dados pontuais, com ela foi possível escolher funções simples para modelar inicialmente a batimetria, sem considerar outras variáveis pertinentes que afetam a interação entre as ondas eletromagnéticas e o alvo principal – o fundo do reservatório, tais como: os sedimentos em suspensão, os pequenos vegetais na coluna de água e as distorções devidas à anisotropia da atmosfera terrestre. Estas variáveis já são consideradas pela imprecisão do método que é não-tendencioso e conduz a estimativas precisas nos pontos amostrados.

Finalmente, a metodologia desenvolvida, nesta pesquisa, apresentou resultados promissores, sendo proposta como mais uma ferramenta a ser explorada para subsidiar o gerenciamento dos reservatórios de usinas hidrelétricas.

## Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos:

- ao Instituto Militar de Engenharia – IME / Exército Brasileiro;
- à Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – COPPE / UFRJ;
- ao Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro – DRM / RJ;
- à Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro – CERJ;
- à Universidade Estadual do Rio de Janeiro – LABGIS / UERJ;
- à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM;
- ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE;

sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

## Referências Bibliográficas

Carvalho, N. O.; Júnior, N. P. F.; Santos, P. M. C. e Lima, J. E. F. W. **Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios**, Brasília, DF, ANEEL – 2000.

CERJ. **Estudos e Diagnóstico do Assoreamento dos Reservatórios das Usinas Hidrelétricas de Areal e Fagundes**, FAHMA Planejamento e Engenharia Agrícola LDTA, Brasília, 2000.

ICOLD – International Commission on Large Dams. **Sedimentation control of reservoirs / Maîtrise de l'alluvionnement des retenues**, Paris, Committee on Sedimentation of Reservoirs, 1989.

Journel, A. G. e Huijbregts, C. J. **Mining Geostatistics**, Academic Press Inc, Londres, 1978.

Mahmood, K., Reservoir Sedimentation – Impact, Extent and Mitigation, Washington, DC, **World Bank Tech**, Paper No. 71, 1987.

Matheron, G. **Traité de Geoestatistique**, Technip, v. 1-2, Paris, 1962-1963.

Ribeiro Jr e Diggle. **geoR: Package for Geostatistical Data Analysis**, adquirido de [www.est.ufpr.br/geoR](http://www.est.ufpr.br/geoR) em 27 de julho de 2003.

Setti, A. A.; Lima, J. E. F. W.; Chaves, A. G. M. e Pereira, I. C. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**, 3ª Edição. ANEEL/ANA, Brasília, 2002.