

**Marcel Pereira de Andrade**  
Eng. Ambiental e Sanitarista pela  
Universidade Federal de Juiz de Fora,  
marcel.pdandrade@gmail.com

**Celso Bandeira de Melo Ribeiro**  
DSc. Universidade Federal de Juiz de Fora –  
UFJF, Departamento de Engenharia Sanitária  
e Ambiental – ESA-UFJF  
celso.bandeira@ufjf.edu.br

**Leonardo de Mello Honório**  
DSc. Universidade Federal de Juiz de Fora –  
UFJF, Departamento de Engenharia Elétrica  
leonardo.honorio@ufjf.edu.br

**André Luis Marques Marcato**  
DSc. Universidade Federal de Juiz de Fora –  
UFJF, Departamento de Engenharia Elétrica  
andre.marcato@ufjf.edu.br

**Jonatas Costa Moreira**  
MSc. Hicon – Engenharia de Recursos  
Hídricos  
jonatas@hicon.com.br

**Luiz Gustavo Fortes Westin**  
Engenheiro Especialista da Neoenergia  
lwestin@neoenergia.com

## CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E HIDROLÓGICA DA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DA UHE DE ITAPEBI

**Resumo:** Nos estudos atuais relacionados aos recursos hídricos, as ferramentas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e análises estatísticas, vem apresentando grande potencial no auxílio à caracterização morfométrica e hidrológica em bacias hidrográficas. Esse trabalho tem por objetivo utilizar essas ferramentas para realizar uma caracterização morfométrica e hidrológica da bacia hidrográfica à montante da usina hidrelétrica de Itapebi, localizada na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha. Os resultados mostram, sob o ponto de vista morfométrico, que a bacia é pouco susceptível a picos de enchentes, com predominâncias de baixas velocidades de escoamento e boa tendência à acumulação de água na rede de drenagem. O relevo é predominantemente ondulado a fortemente ondulado em toda a bacia. As classes de uso e cobertura do solo predominantes foram pastagem, savana arborizada e floresta. Do ponto de vista hidrológico os testes estatísticos apontaram para uma tendência da diminuição na magnitude das vazões médias e mínimas da bacia ao longo do tempo. Já sob o ponto de vista do comportamento sedimentométrico, a bacia apresentou uma baixa descarga de sedimentos em suspensão, com magnitudes da ordem de 35,7 t/ano.km<sup>2</sup>.

**Palavras-chave:** Hidrologia, Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento, Morfometria, Hidrossedimentologia.

## PHYSICAL AND HYDROLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE ITAPEBI POWERPLANT

**Abstract:** In current studies related to water resources, tools for geoprocessing, remote sensing and statistical analysis, have presented great potential in assisting the morphometric and hydrological characterization in watersheds. This work aims to use these tools to perform a morphometric and hydrological characterization of the hydrographic basin upstream of the Itapebi hydroelectric power plant located in the Jequitinhonha river basin. The results show that the basin is poorly susceptible to flood peaks, with predominance of low flow velocities and a good tendency to accumulate water in the drainage network. The topography is predominantly wavy and the strong wavy across the basin. Predominant land use and cover classes were grassland, wooded savanna and forest. From the hydrological point of view, the statistical tests pointed to a tendency of the decrease in the magnitude of the mean and minimum flows of the basin over time. From the standpoint of sedimentometric behavior, the basin presented a low sediment discharge in suspension, with magnitudes of the order of 35.7 t/year.km<sup>2</sup>.

## INTRODUÇÃO

No Brasil, a construção de grandes represas com o intuito de reservar água para geração de energia elétrica e abastecimento da população teve início no ano de 1901 (ESTEVES, 2011).

O represamento da água ocasiona a alteração do regime lóxico para lentic, que por sua vez influencia a dinâmica hídrica a montante e a jusante da barragem.

Assim, a caracterização física e hidrológica da bacia de contribuição para o reservatório de uma usina hidrelétrica torna-se importante, pois possibilita realizar um melhor gerenciamento desse ambiente.

Técnicas de geoprocessamento tem sido amplamente empregadas no estudo de caracterização de bacias hidrográficas (SANTOS *et al.*, 2012; ROCHA *et al.*, 2014).

O objetivo desse estudo foi avaliar os parâmetros morfométricos, a descarga de sedimentos em suspensão e o comportamento da vazão na bacia de contribuição da UHE de Itapebi.

## MATERIAL E MÉTODOS

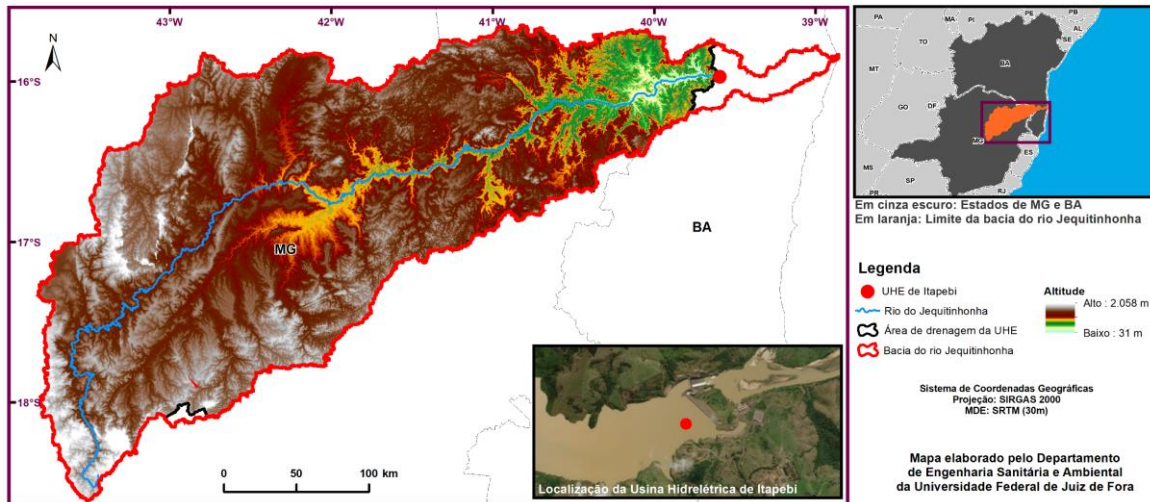
A usina hidrelétrica (UHE) de Itapebi está instalada no município de Itapebi-BA e dentro dos limites da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, que possui uma área de drenagem de aproximadamente de 70.315 km<sup>2</sup>, dos quais 93%, se encontra dentro dos limites do Estado de Minas Gerais e o restante no sudeste da Bahia. O rio Jequitinhonha nasce na Serra do Espinhaço, no município do Serro/MG, a uma altitude aproximada de 1.267 m e, após percorrer cerca de 918 km de extensão, chega ao local da barragem da UHE de Itapebi a uma altitude de 31m. Os principais afluentes do rio Jequitinhonha são os rios Itacambiruçu, Salinas, São Pedro e São Francisco pela margem esquerda, e Araçuaí, Piauí e São Miguel, pela margem direita.

A bacia de contribuição referente a UHE de Itapebi compreende 97 municípios, estando 51 totalmente inseridos na bacia e 46 parcialmente inseridos. A hidrelétrica de Itapebi possui 462.011 KW de potência instalada, de acordo com o despacho N<sup>o</sup> 3.095 de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica

(ANEEL). O limite e a representação do relevo da área de estudo se encontram na

Figura 1.

**Figura 1** – Localização da bacia de contribuição da UHE de Itapebi



A área de drenagem da UHE de Itapebi foi obtida em um ambiente SIG, a partir do modelo digital de elevação (MDE) SRTM, com resolução espacial de 30m. Com base nesse dado realizou-se a caracterização morfométrica da área em estudo.

A densidade de drenagem (Dd) foi calculada com base na hidrografia otocodificada elaborado pela Agência Nacional de Águas, cuja a escala é de 1:100.000 (VILLELA e MATTOS, 1985; TUCCI, 2002). Valores baixos de Dd caracterizam uma drenagem deficiente, em contrapartida valores elevados (acima de 3,5) indicam uma alta drenagem, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1** – Classificação da densidade de drenagem

Dd (Km/Km <sup>2</sup> )	Classificação
< 0,50	Baixa
0,5 – 2,0	Mediana
2,01 – 3,5	Alta
> 3,5	Muito Alta

Fonte: Beltrame (1994).

Além disso, bacias com valores altos de Dd indicam uma maior eficiência de drenagem, ou seja, mais rapidamente uma partícula de água oriunda da chuva chegará ao exutório da bacia. A densidade de drenagem pode ser obtida pela equação 1, logo abaixo.

$$D_d = \frac{\sum L}{A} \quad \text{equação}$$

(1) Onde:

-  $\Sigma L$  é o comprimento total dos cursos d'água da bacia em km;

- A área da bacia em km<sup>2</sup>;

O fator de forma (kf), que é a razão entre a área da bacia (A) e o comprimento do eixo da bacia (L), foi obtido conforme a equação 2. Esse coeficiente é importante para avaliar a susceptibilidade de uma bacia a picos de enchente. Quanto menor o valor de kf mais comprida é a bacia e, portanto, o tempo de concentração (tc) da partícula é maior e menos susceptível a picos de enchente é a bacia.

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad \text{equação (2)}$$

Onde:

- L é o comprimento da bacia em km;

- A área da bacia em km<sup>2</sup>;

O coeficiente de compacidade (Kc), relação entre o perímetro da bacia e a área da mesma foi determinado pela equação 3. Valores de Kc próximos a 1 remetem a bacias com geometria próxima à de um círculo, nas quais o escoamento converge ao mesmo tempo para um pequeno trecho do rio principal, indicando uma tendência à ocorrência de maiores picos de enchente.

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{equação (3)}$$

Onde:

- P é o perímetro da bacia em km;

- A área da bacia em km<sup>2</sup>;

Outro parâmetro calculado foi o índice de sinuosidade do rio principal (Is), relação entre o comprimento do rio e o comprimento em linha reta entre as extremidades do curso d'água, conforme equação 4. Valores elevados de Is indicam velocidades de escoamento menores, conseqüentemente, maior retenção da água no interior da bacia (BRUBACHER et al., 2011). Valores de Is próximos de 1 caracterizam o rio como retilíneo; acima de 2 como sinuoso; e valores intermediários como de transição, de acordo com Freitas (1952).

$$I_s = \frac{L}{dv} \quad \text{equação (4)}$$

Onde:

- L é o comprimento da bacia em km;

- dv é o comprimento em linha reta do curso d'água;

A ordenação dos cursos d'água foi elaborada segundo a metodologia de Strahler. O perfil topográfico do rio principal, foi obtido através intersecção do MDE com a feição do rio Jequitinhonha.

O mapa de declividade foi classificado de acordo com os critérios da EMBRAPA (1979).

Para caracterização do uso e cobertura do solo foram utilizadas imagens do produto Land Cover tipo 2 do sensor MODIS de 2001 a 2013.

A análise de tendência no comportamento das vazões foi realizada com aplicação do teste não paramétrico de Mann-Kendall, metodologia que vem sendo muito utilizada em estudos hidrológicos com o objetivo de avaliar a significância de tendências temporais de variáveis como precipitação, vazão e qualidade da água (MARENGO, et al. 2005; YUE et al., 2002; SAGARIKA et al., 2014).

O teste estatístico foi aplicado para vazões médias de longo termo e para vazões mínimas, em oito estações fluviométricas do rio Jequitinhonha, da seguinte forma: seja uma série temporal  $(X_i, X_{i+1}, \dots, X_n)$  resultante de uma amostra com  $n$  variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas. A estatística do teste de Mann-kendall ( $S$ ) é obtida através do somatório dos sinais da diferença entre os valores  $(X_i)$  e os seus futuros valores  $(X_j)$ , Equação 5. Quando o valor de  $S$  é positivo indica que tendência de aumento e quando o mesmo é negativo indica tendência de diminuição.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{ sinal}(X_j - X_i) \quad \text{equação (5)}$$

Onde

$$\text{ sinal}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{se } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (X_j - X_i) < 0 \end{cases}$$

Nos casos em que  $n \geq 10$  a variável  $S$  possui características de uma distribuição normal, onde sua variância ( $\text{Var}(S)$ ) e o índice de distribuição normal ( $Z$ ) podem ser calculados por meio das Equações 6 e 7.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-2)(2m+5) - \sum_{j=i+1}^n t_j(i)(i-1)(2i+5)}{18} \quad \text{equação (6)}$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad \text{equação (7)}$$

Como o teste é bi-caudal, a hipótese  $H_0$  (hipótese nula) deve ser rejeitada nos casos em que o valor absoluto de  $Z$  for superior a  $Z_{\alpha/2}$ , em que  $\alpha$  é o nível de significância. Neste estudo será considerado um valor de  $\alpha$  e 5%.

Por fim, estimou-se a descarga sólida em suspensão na estação 54780000 no rio Jequitinhonha, aquela com dados de sedimentos mais próxima do reservatório da UHE de Itapebi. Para a estimativa da descarga sólida utilizou-se a equação 8.

$$Q_{SS} = 0,0864 * Q_{liq} * C_{SS} \quad \text{equação (8)}$$

Onde,  $Q_{SS}$  é a descarga sólida/fluxo de sedimentos em suspensão (t/dia),  $Q_{liq}$  a descarga líquida ou vazão ( $m^3/s$ ) e  $C_{SS}$ : a concentração de sedimentos em suspensão (mg/L ou ppm).

Após determinar a descarga sólida em suspensão, foi obtida a curva-chave de sedimentos, seguindo a metodologia disposta por Carvalho *et al.* (2000). O objetivo dessa é correlacionar os valores de Qss e Qliq, de modo a encontrar uma equação que permita obter a descarga sólida em suspensão em função da vazão.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da análise morfométrica da bacia de contribuição da UHE de Itapebi se encontra na Tabela 2.

**Tabela 2** – Resultado dos parâmetros morfométricos da bacia de contribuição da UHE de Itapebi

Parâmetros	Valores	Análise
Área de drenagem	67.802 km <sup>2</sup>	-
Perímetro	2.125 km	-
Índice de sinuosidade	1,86	Transição
Coefficiente de compacidade (Kc)	2,28	-
Fator de forma (Kf)	0,26	-
Densidade de drenagem (Dd)	1,23	Drenagem regular (escala 1:100.000)

Fonte: Autoria Própria – 2019.

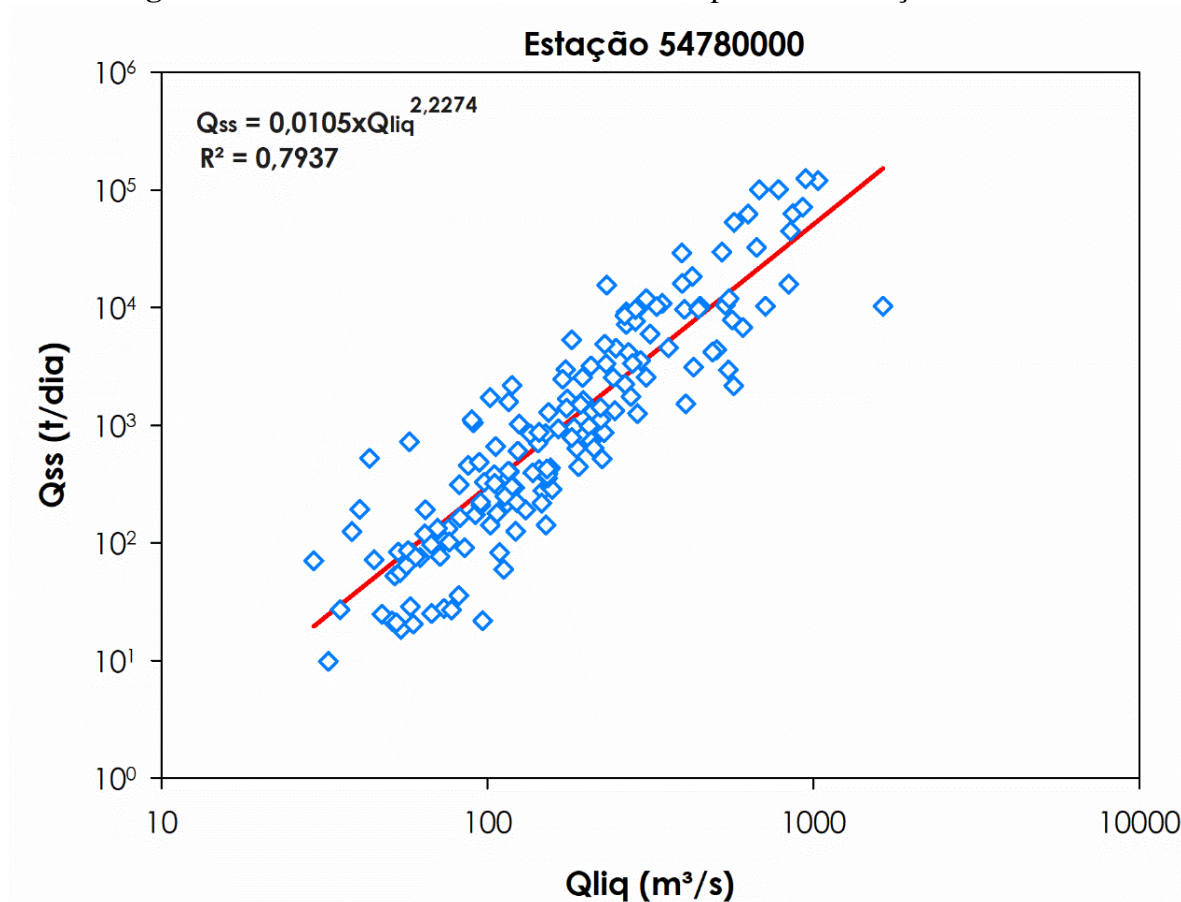
Observa-se que a área em estudo apresenta um fator de forma de 0,26, caracterizando como pouco susceptível a picos de enchentes. A drenagem foi classificada como regular, isso para uma escala de 1:100.000. De acordo como valor encontrado para o índice de sinuosidade o rio Jequitinhonha é classificado como de transição.

A equação obtida para a estimativa da descarga sólida é apresentada na Figura 2.

O trecho do rio Jequitinhonha possui ordem 7 até a UHE e possui declividade média de 1,63%, tendo o relevo mais acentuado nos seus primeiros 60km.

Predomina na área de estudo dois tipos de relevo, o ondulado e o fortemente ondulado, que correspondem a 34,42% e 34,89% da bacia de contribuição, como pode ser visto no resultado apresentado na Tabela 3.

**Figura 2** – Curva-chave de sedimentos em suspensão da estação 54780000



**Tabela 3** - Caracterização do relevo na bacia de contribuição da UHE de Itapebi

Classe	Classe de relevo	Declividade (%)	Área (km²)	Área da classe em porcentagem
1	Plano	0 – 3	5.148,85	7,59%
2	Suave ondulado	3 – 8	11.463,53	16,91%
3	Ondulado	8 – 20	23.335,39	34,42%
4	Fortemente ondulado	20 – 45	23.654,51	34,89%
5	Montanhoso	45 – 75	3.881,22	5,72%
6	Escarpado	> 75	318,10	0,47%

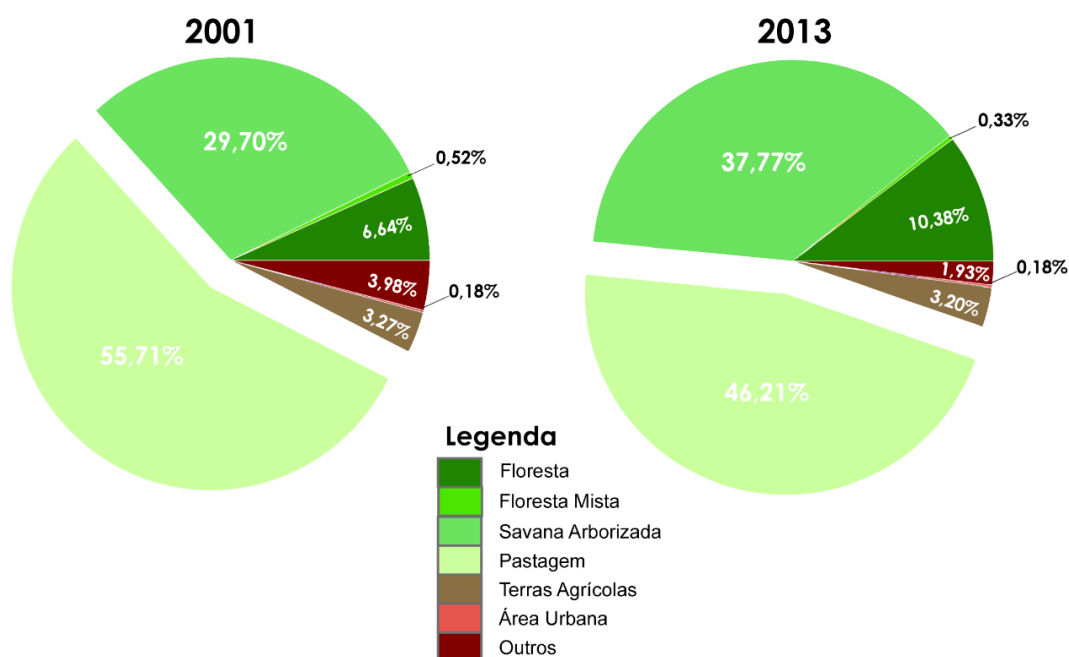
De acordo com o resultado apresentado nos gráficos da Figura 3 as classes de uso do solo predominantes, no

período de 2001 a 2013, na bacia de contribuição da UHE de Itapebi foram as classes Pastagem, Savana arborizada e

Floresta. Mesmo este ranking se mantendo constante ao longo do período estudado, é notório o aumento de áreas de Floresta e de Savana arborizada, cujos acréscimos foram de 3,74% e 8,08% respectivamente. Observou-se também que as áreas de pastagem diminuíram em 9,50%. Portanto, as alterações do uso e cobertura apresentaram-se de forma positiva, pois houve o aumento de áreas com maior

cobertura vegetal e a diminuição de áreas como pastagem, as quais, por possuírem baixa cobertura vegetal, podem contribuir para o aumento do escoamento superficial e consequentemente, para o aumento de sedimentos carreados até o curso d'água, lembrando que grande parte da bacia de contribuição possui solos propícios à erosão.

**Figura 3** – Área das classes de uso e cobertura do solo, em porcentagem, para o ano de 2001 e 2013

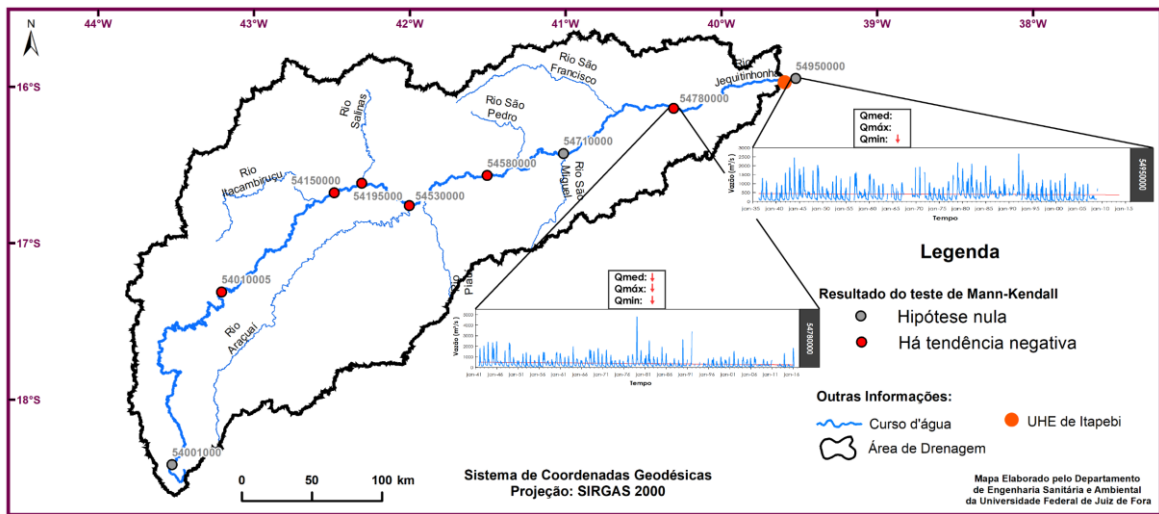


Na Figura 4 se encontra o resultado do teste estatístico de Meann-Kendall, onde observa-se que as vazões médias e mínimas mensais apresentaram tendência decrescente (para o índice de significância de 5%) em 6 das 8 estações

estudadas, com destaque para a estação imediatamente a montante da barragem (54780000).



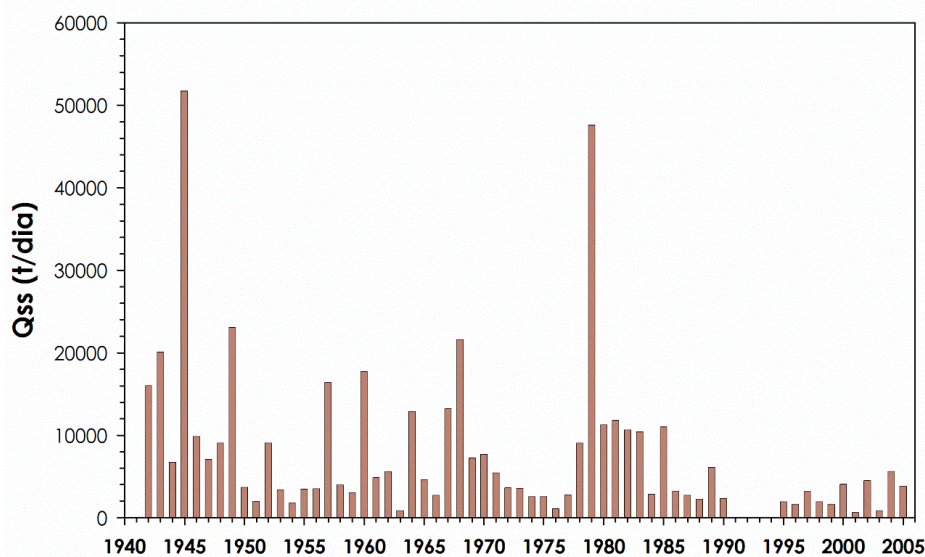
**Figura 4** – Análise de tendências do teste de Meann-Kendall de vazões ao longo do rio Jequitinhonha, à montante da UHE de Itapebi



A Figura 5 mostra o comportamento das descargas médias anuais de sedimento em suspensão. Nesta figura observam-se dois picos de Qss, sendo o primeiro ocorrido em 1945 e outro em 1979. Além disso, na Tabela 4 se encontra um resumo dos resultados

obtidos a partir da vazão média de longo termo. Destaca-se o resultado da descarga específica de sedimentos em suspensão ( $Q_{ss.esp}$ ) que foi de 35,7 t/ano.km<sup>2</sup>, valor que pode ser considerado baixo (CARVALHO *et al.*, 2000).

**Figura 5** – Descargas de sedimentos em suspensão médias mensais da estação 54780000.



**Tabela 4** – Resumo de resultados da estação Jacinto (54780000)

<b>Parâmetro</b>	<b>Resultado</b>
QMLT (m <sup>3</sup> /s)	388
Q <sub>ss</sub> (t/d)	6.131,3
Q <sub>ss</sub> (t/ano)	2.237.927,2
Área de Drenagem	62.700,0
Q <sub>esp</sub> (L/s.km <sup>2</sup> )	6,2
Q <sub>ss.esp</sub> (t/ano.km <sup>2</sup> )	35,7
C <sub>ss</sub> (mg/L)	171,0

## CONCLUSÕES

As metodologias de geoprocessamento, sensoriamento remoto e o teste estatístico de Mann-kendall, mostraram-se adequados para a realização da caracterização morfométrica e hidrológica da bacia de contribuição à montante da UHE de Itapebi.

Os resultados mostraram que a bacia possui uma topografia predominantemente ondulada a fortemente ondulada. Sob o foco de hidrologia e estatística verificou-se uma tendência da

diminuição na magnitude das vazões médias e mínimas da bacia ao longo do tempo. Já sob o ponto de vista do comportamento sedimentométrico, a bacia apresentou uma baixa descarga de sedimentos em suspensão.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANEEL, projeto P&D-CÓD. PD-00453-0017/2017 e a empresa Neoenergia, pelo apoio concedido.

## REFERÊNCIAS

BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas: modelo de aplicação**. Florianópolis: UFSC, p.112, 1994.

BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. Suscetibilidade de enchentes a partir da análise das variáveis morfométricas na bacia hidrográfica do rio dos Sinos/RS. In: **SIMPÓSIO**

## **BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO**

**REMOTO, 15. (SBSR), 2011**, Curitiba.

Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1863-1870. 1 DVD. ISBN: 978-85-17-00057-7.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA, N. P.; SANTOS, P.M.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: Aneel, 2000, 132p.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ)**. Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p.

FREITAS, R. O. Textura de drenagem e sua aplicação geomorfológica. **Boletim Paulista de Geografia**, v. 11, p. 53-57, 1952.

MARENCO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.

ROCHA, R. M.; LUCAS, A. A. T.; ALMEIDA, C. A. P.; NETO, E. L. M.; NETTO, A. O. A. Caracterização morfométrica da sub-bacia do rio Poxim-Açu, Sergipe, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 9 n. 2, 2014.

SAGARIKA, S., A. KALRAB, AND AHMADA, S. Evaluating the effect of persistence on long-term trends and analyzing step changes in streamflows of the continental United States. **Journal of Hydrology**, 517, p. 36–53, 2014

SANTOS, A. M.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v. 7, n.3, 2012.

TUCCI, C .E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 3. ed. Universidade/UFRGS, 2002.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGRAWHill do Brasil, 1975.

YUE, S.; PILON, P. J.; PHINNEY, B.; CAVADIAS, G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. **Hydrological processes**, v. 16, n. 16, p. 1807-1829, 2002.