

MODELAGEM COMPUTACIONAL HIDRODINÂMICA UNIDIMENSIONAL PARA CARACTERIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Marcos Guilherme Moreira Pinto ¹; & José Carlos de Melo Bernardino ²

ABSTRACT – The Paraíba do Sul River is an alluvial watercourse that, since the 1950s, has suffered great human interference due to its mineral and water exploration potential. The knowledge of its river dynamics is of great importance for the appropriate use of its resources with impacts of low magnitude for the environment and the nearby communities. In line with this objective, one-dimensional computational modeling with the HEC-RAS program allows satisfactory reproduction of sediment transport along rivers, by solving the energy and mass conservation equations in a control volume, as long as it is accompanied with correct data entry and model calibration. In this case study, the São Paulo reach of the Paraíba do Sul River was subject to a 30-year simulation between 1982 and 2012, taking into account the availability of data provided by the responsible state and federal agencies. Over a length of more than 200 km, four fluvimetric stations have fundamental information for the development and calibration of the model, such as daily series of flow and water level, and annual data of sediment concentration and cross sections bathymetry. The results brought by the hydrodynamic calibration and river bed change at the end of the simulation period proved to be adequate.

Palavras-Chave – Modelagem computacional; Calibração; Rio Paraíba do Sul

1) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (PHA), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), Av. Prof. Almeida Prado, 83 trav. 2 – Cidade Universitária – CEP 05508-900 – São Paulo/SP, marcos.pinto@usp.br, (11) 94890-7989

2) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (PHA), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), Av. Prof. Almeida Prado, 83 trav. 2 – Cidade Universitária – CEP 05508-900 – São Paulo/SP, jcarlosbernardino@usp.br, (11) 99151-5173

1 - INTRODUÇÃO

O Rio Paraíba do Sul é um rio brasileiro que atravessa os estados de São Paulo e Rio de Janeiro, pertencente à Bacia Hidrográfica do Atlântico Sudeste. No trecho paulista, possui uma extensão de pouco mais de 300 km, desde a nascente, na confluência dos rios Paraitinga e Paraibuna, até o município de Areias, na divisa com o estado do Rio de Janeiro.

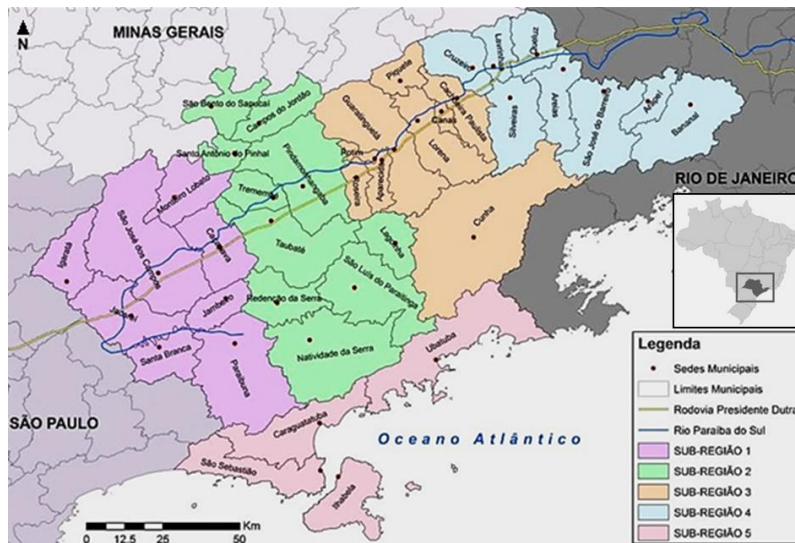


Figura 1 - Localização do trecho paulista do Rio Paraíba do Sul (fonte: adaptado de CEIVAP, 2018).

Este curso d'água aluionar escoar sobre uma região densamente ocupada e, desde a década de 50, segundo Barreti (2005), vem sendo explorado e modificado de diversas formas, através da construção de reservatórios para geração de energia e regularização de vazões para captação de água, cortes de meandros para controle de inundações, atividades de extração mineral, lançamento de efluentes, entre outros. De acordo com IPT (2015), o processo de interiorização da economia paulista nessa época impulsionou a demanda por recursos hídricos e mineiras no Vale do Paraíba, o que acabou degradando o equilíbrio morfológico que o curso d'água apresentava.

A partir das décadas de 70 e 80, foi solicitada, por parte do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), uma série de levantamentos de campo na região, para se conhecer melhor as características desse curso d'água, incluindo batimetrias e medições de descarga sólida e de velocidade, e com isso permitir a definição de critérios para mitigar os problemas e apontar soluções.

Neste trabalho, serão apresentados o desenvolvimento e calibração de um modelo computacional hidrodinâmico unidimensional, por meio do software HEC-RAS, para simulação da evolução morfológica do trecho paulista do Rio Paraíba do Sul de 1982 a 2012. Espera-se, com esse modelo, agregar conhecimento sobre a dinâmica fluvial e construir uma ferramenta que possa auxiliar a gestão dos recursos hídricos locais.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Disponibilidade de dados

No trecho paulista do Rio Paraíba do Sul foram selecionados os limites de montante e jusante a serem estudados. A escolha se deu em virtude da disponibilidade de dados na região, que foram obtidos nas décadas de 1970 e 1980 por meio de um convênio entre o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE-SP) e a Universidade de São Paulo (USP). Nos relatórios técnicos de CTH (1981) e CTH (1983), foram levantadas 192 seções batimétricas desde a cidade de Jacareí (Seção 191 de montante, $45^{\circ}58'35''$ W, $23^{\circ}18'29''$ S) até a cidade de Cachoeira Paulista (Seção 00 de jusante, $45^{\circ}00'12''$ W, $22^{\circ}39'16''$ S), ao longo dos mais de 200 km de curso d'água. A Figura 2 ilustra o trajeto e os municípios próximos ao rio.

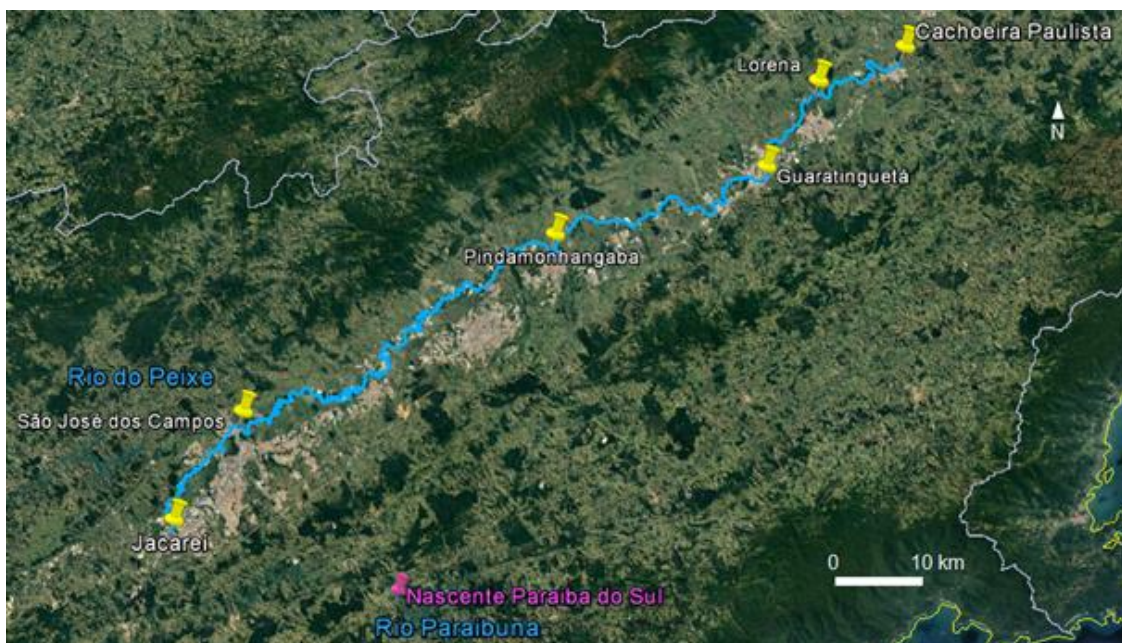


Figura 2 - Trecho de estudo do Rio Paraíba do Sul e localização de pontos de medições. Fonte: adaptado de Google Earth (2020).

Adicionalmente, dentro da base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) estão presentes informações de descarga líquida, nível d'água, descarga sólida e seção transversal de alguns dos postos da região em estudo, ao longo de vários anos, permitindo que se compare os resultados obtidos na modelagem com aquilo que é de fato observado em campo. A Tabela 1 apresenta as características das séries de descargas líquidas e nível d'água de seus postos com dados disponíveis em ANA (2019). Os dados possuem frequência diária de coleta, e a leitura de nível d'água é feita com o uso de régua limnimétricas, enquanto que as vazões são calculadas pelo método de soma de parcelas de vazões em faixas verticais da seção.

Tabela 1 - Estatísticas das séries de vazões utilizadas no modelo.

Posto	Vazão Mínima (m ³ /s)	Vazão Média (m ³ /s)	Vazão Máxima (m ³ /s)	Tamanho da série	Área de drenagem (km ²)
S191 - Jacareí	0,9	72,1	363,9	2000-2019	5.575
S73 - Pindamonhangaba	47,1	153,6	702,5	1982-2019	9.479
S33 - Guaratinguetá	43,8	173,1	751,5	1982-2019	10.800
S18 - Lorena	48,0	198,3	577,0	1982-2014	11.200
S02 - Cachoeira Paulista	43,7	186,8	765,4	1982-2016	11.687

A série de vazões da seção 191, que é tida como seção de entrada do modelo, por não cobrir todo o período planejado de simulação (1982 a 2012), demandou o preenchimento através da regionalização de vazões. Utilizando como parâmetro característico a vazão específica em cada posto (vazão líquida dividida pela área de drenagem), comparou-se a variação desse parâmetro em cada posto, plotando-se o gráfico da Figura 3. Nele, se pode constatar que as vazões específicas nos cinco postos seguem padrões próximos uns dos outros, com valor médio entre 16 L/s/km² e 20 L/s/km². O posto de Jacareí teve, dessa forma, o preenchimento de sua série de vazões, entre 1982 e 1999, tomando-se por base a evolução da vazão específica do posto de Pindamonhangaba, que é o posto mais próximo.

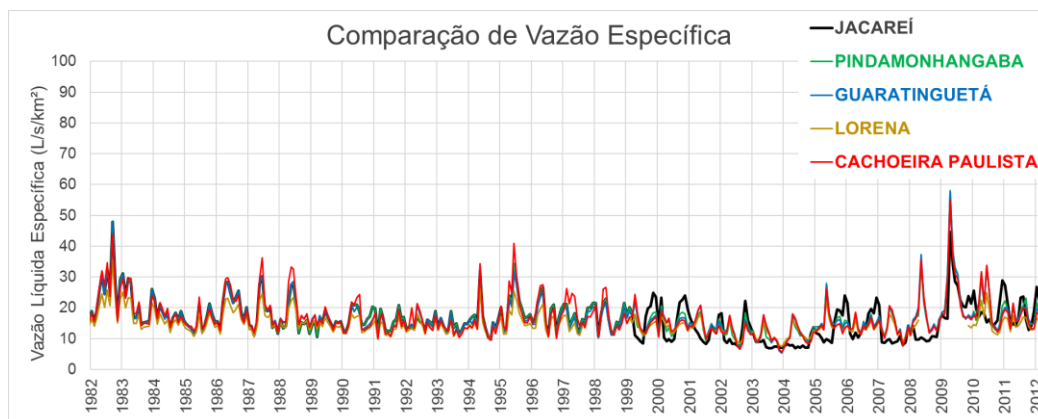


Figura 3 - Vazões específicas médias mensais dos postos.

Em relação aos dados sedimentológicos, dispõem-se de informações abundantes apenas no posto S73 – Pindamonhangaba, que apresenta um histórico de medição de concentração de sólidos em suspensão de 1994 até os dias atuais, sendo realizada quatro vezes ao ano, três em períodos chuvosos, e uma durante os mais secos. Para aprimorar essa base de dados, contou-se ainda com os levantamentos registrados em CTH (1981) e CTH (1983), que trazem informações a respeito das características dos sedimentos tais como distribuição granulométrica ao longo do trecho e relação entre vazão sólida total e de fundo, além de dispor de séries de descargas sólidas em suspensão de

1979 a 1982, o que permite o estabelecimento de curvas-chave sólidas que, por conseguinte, auxiliam o preenchimento de séries em postos com escassez de dados.

2.2 - Equações do Modelo

O desenvolvimento da modelagem computacional se deu segundo o uso do software HEC-RAS, *Hydraulic Engineering Center - River Analysis System*, desenvolvido em 1995 pelo *US Army Corps of Engineers*. Para a finalidade deste trabalho, são de especial interesse dois módulos do programa:

- *Quasi-unsteady*: componente hidrodinâmico que discretiza um hidrograma (regime não-permanente) em um conjunto de vazões constantes no tempo (regime permanente).
- *Sediment Transport*: compreende o módulo onde são definidas as séries mássicas de sedimentos, as suas características granulométricas, os métodos de cálculo de transporte, os limites móveis da seção transversal, etc.

No módulo hidrodinâmico do HEC-RAS, dada uma série de descargas líquidas na seção de entrada do modelo, o programa busca resolver a equação de conservação de energia aplicada em um volume de controle do fluido (equação de Bernoulli).

$$z_1 + y_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

sendo z [m] a cota de fundo da seção; y [m] a profundidade do escoamento na seção; α o coeficiente de Coriolis; V [m/s] a velocidade média do escoamento na seção; g [m/s²] a aceleração da gravidade; h_e [m] a perda de carga entre as seções; e 1 e 2 os índices referentes às seções de montante e jusante, respectivamente.

Basicamente, no módulo de transporte de sedimentos, o problema envolve a determinação da variação de profundidade de erosão ou deposição a que está sujeita a seção transversal quando o aporte sólido e a capacidade de transporte são diferentes. Logo, o objetivo é resolver uma equação de balanço de massa em um volume de controle, equação de Exner apresentada abaixo, e assim, calcular as alturas erodidas ou assoreadas na seção transversal.

$$(1 - \lambda_b)B \frac{\partial z}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad (2)$$

sendo λ_b porosidade da camada ativa do leito; B [m] a largura do canal; z [m] a elevação do fundo do canal; Q_s [m³/s] a vazão sólida; x [m] a distância ao longo do canal; t [s] o tempo.

Por se tratar de um modelo unidimensional, o HEC-RAS distribui as variações de volume apenas na direção vertical, conforme se observa na Figura 4.

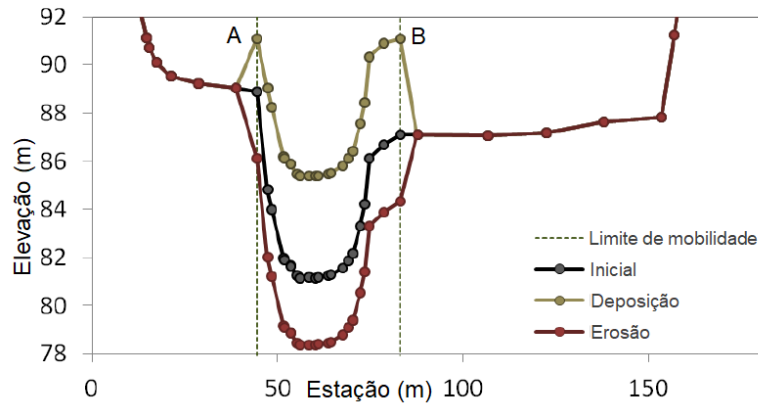


Figura 4 - Método do HEC-RAS para alteração da seção. Fonte: adaptado de USACE (2016).

2.3 - Preparação do modelo

A preparação do modelo envolve a definição da grade numérica, da geometria das seções e suas rugosidades, as condições de contorno e a calibração do modelo, entre outros procedimentos. Calibrar o modelo para responder de maneira adequada aos dados de entrada demanda a determinação dos coeficientes de resistência ao escoamento, n de Manning, nas seções do modelo. Em CTH (1981), esses valores foram previamente calibrados, de acordo com as medições de vazão e nível d'água feitas à época.

Em relação às condições de contorno, estas estão ilustradas na Figura 5 e compreendem:

- Hidrograma correspondente à série de S191 – Jacareí.
- Descargas sólidas totais na seção de entrada, S191 – Jacareí.
- Curva chave na seção de jusante S00.
- Vazões laterais uniformemente distribuídas referentes às contribuições dos afluentes, incluindo as vazões sólidas estimadas por curvas chave sólidas locais.

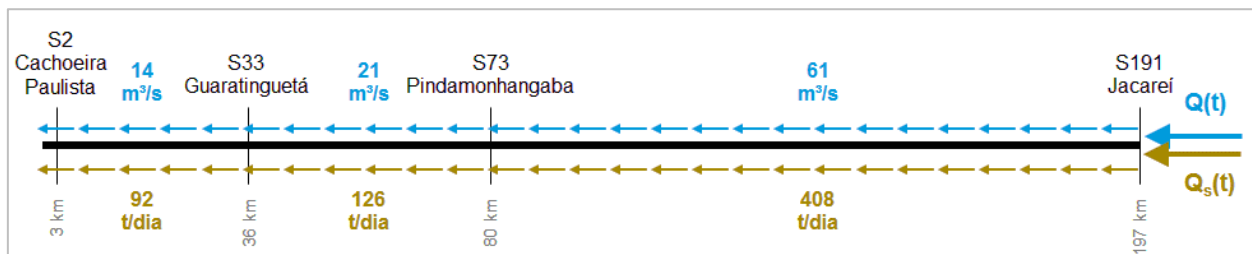


Figura 5 - Condições de contorno adotadas no trecho em estudo.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A calibração do módulo hidrodinâmico foi verificada nas seções referidas na Tabela 1 e considerando as descargas líquidas definidas. A título de exemplo, exibe-se o resultado do posto S73 – Pindamonhangaba na Figura 6.

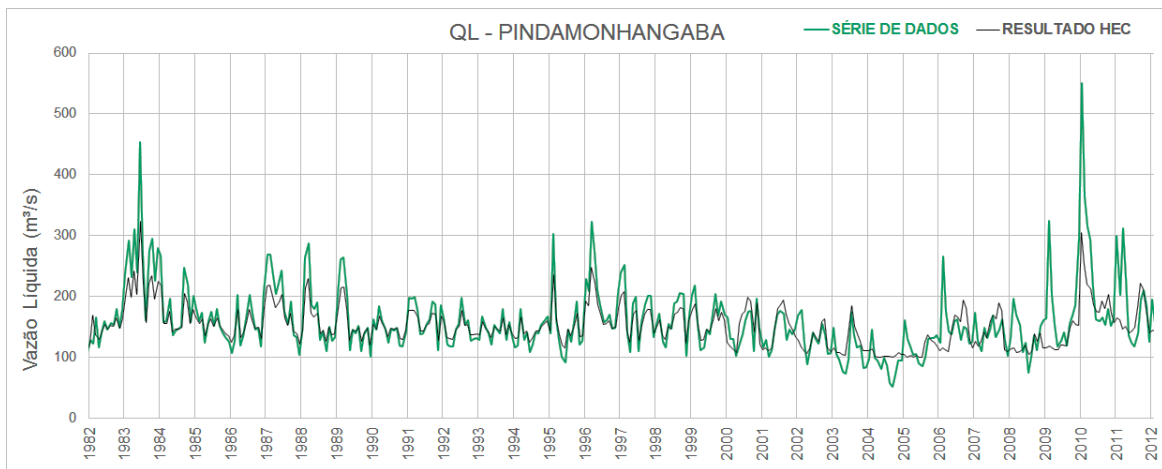


Figura 6 - Comparação entre as seções simuladas e observadas em S73.

Nas demais seções, observou-se um padrão similar entre os valores observados e advindos da simulação. Para comparar os dois resultados, calculou-se o desvio quadrático médio normalizado (NRMSD) em relação à vazão média entre os períodos de 1982 e 2012. Na Tabela 2, estão apresentados os valores calculados de NRMSD, mostrando que existe uma boa aderência entre as duas séries, admitindo-se que $NRMSD \leq 0,3$ seja um critério adequado para essa validação estatística.

Tabela 2 - Valores de NRMSD resultantes da calibração do modelo.

Posto	S73 – Pindamonhangaba	S33 – Guaratinguetá	S18 – Lorena	S02 – Cachoeira Paulista
NRMSD	0,23	0,25	0,18	0,31

Por fim, com a simulação realizada entre 1982 e 2012, o HEC-RAS é capaz de gerar diversos resultados, incluindo a variação altimétrica do leito do canal, como exibido na Figura 7, comparando-se simultaneamente as variações observadas dos Postos S02 – Cachoeira Paulista, S33 – Guaratinguetá e S73 – Pindamonhangaba.

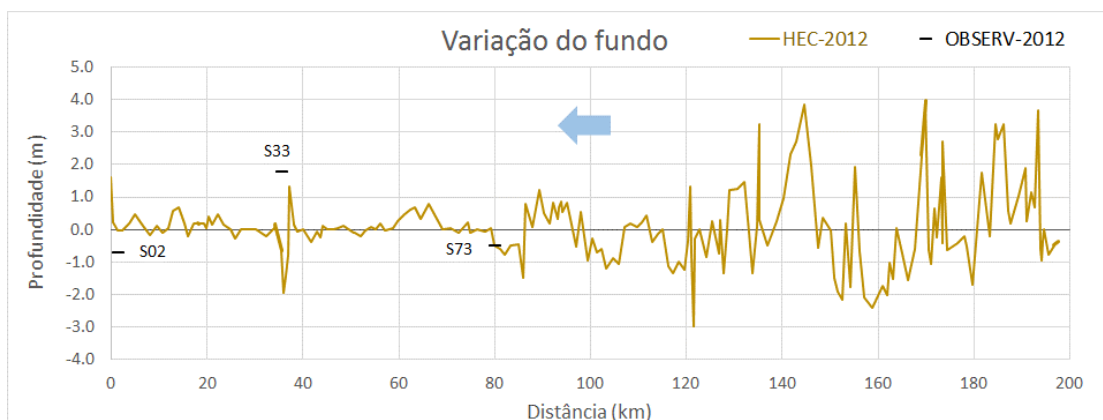


Figura 7 - Simulação da variação do leito do Rio Paraíba do Sul entre 1982 e 2012.

Analisando-se o gráfico, constata-se que existe uma proximidade entre as posições do fundo das seções simuladas e observadas, indicando, ao menos, uma razoável representação das tendências de deposição e erosão por parte do modelo de transporte de sedimentos.

4 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A construção de um modelo computacional unidimensional para representar a evolução morfológica do trecho paulista do Rio Paraíba do Sul exigiu a seleção de uma série de dados hidrossedimentológicos e definições das condições de contorno usadas no modelo, que apresentou bons resultados na sua etapa de calibração, pela aderência entre os valores simulados e observados.

Com isso, o modelo se encontra preparado para simulações diversas, que envolvam outras variáveis intervenientes na bacia, como, por exemplo, extrações de areia ou captações de água, passíveis de serem modeladas no ambiente do HEC-RAS. Conseqüentemente, o modelo calibrado pode auxiliar a gestão dos recursos hídricos locais, uma vez que potenciais intervenções no Rio Paraíba do Sul podem ter seus impactos dimensionados, permitindo assim a definição de critérios que determinem níveis adequados de exploração desses recursos.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (2019). *Portal Hidroweb*. Disponível em <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em 06/09/2019.

BARRETI, L. R. (2005). *Evolução morfológica do Rio Paraíba do Sul por ações antrópicas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil apresentada à Escola Politécnica da USP. São Paulo.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL – CEIVAP (2018). *Relatório de Situação – Bacia do Rio Paraíba do Sul. 2018*. AGEVAP. Rio de Janeiro.

CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA – CTH (1981). *Paraíba: Estudo Morfológico do rio. Relatório Parcial nº 3. v. 4 – Desenhos*. Convênio DAEE e EPUSP, São Paulo.

CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA – CTH (1983). *PARAIBA DO SUL (rio): Estudo Morfológico – Relatório Parcial nº 8. v. 1/4 – Textos, Tabelas e Fotografias*. Convênio DAEE e EPUSP, São Paulo.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT (2015). *Ordenamento Territorial Geomineiro. Área: Região Metropolitana do Vale do Paraíba. Relatório Final*. São Paulo.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE (2016). *HEC-RAS. River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 5.0*. Davis – CA.