



Periódico da Universidade Vale do Rio Verde

ISSN: 2526-690X

Edição especial | II SBHSF | 2018



Geraldo Wilson Júnior

Professor Colaborador do Programa de Engenharia Naval e Oceânica da COPPE/UFRJ.

Rio de Janeiro, RJ.

jrwilson@gmail.com

CARACTERÍSTICAS HIDROSEDIMENTOLÓGICAS E MORFOLÓGICAS DE UM TRECHO DO RIO SÃO FRANCISCO, BRASIL

Resumo: Este artigo descreve as características hidrodinâmicas, sedimentológicas e morfológicas observadas num trecho de 10 km de comprimento do Rio São Francisco, na fronteira dos Estados de Minas Gerais e Bahia, a jusante da foz do Rio Verde Grande, Brasil. São resultados de uma cuidadosa análise de dados hidrossedimentométricos de campo, e de aplicações do HEC-RAS, de Sistemas de Tratamento de Imagens de Satélite e do SIG. Os dados hidrossedimentométricos foram obtidos durante uma visita de campo realizada na estação seca, quando os barrancos, praias, bancos de areia, enseadas e ilhas estavam expostos e acessíveis, permitindo o levantamento das trajetórias dos sedimentos e a compreensão da formação morfológica do trecho e evolução dos depósitos sólidos. Os principais objetivos deste artigo foram: (i) apresentar valores das variáveis hidrossedimentológicas do trecho do rio; (ii) descrever os cenários hidrodinâmicos, caracterizados por valores da descarga líquida, da declividade longitudinal da linha d'água e da rugosidade do leito do rio; (iii) destacar o uso de imagens de satélite LANDSAT-5 TM para analisar as margens dos rios e as evoluções dos bancos de sedimentos, e (iv) descrever as formações morfológicas, a evolução dos depósitos sólidos e sua influência na Navegação e estabilidade do trecho do rio. A metodologia, equipamentos, a região e particularidades dos depósitos sedimentares foram descritos, cuidadosamente ilustrados e comparados com padrões clássicos da literatura. Conclui-se que as imagens de satélite descrevem com precisão as evoluções dos bancos móveis e das margens do rio. Recomendam-se medições *in-situ* e o uso de imagens de satélite para calibração e validação dos modelos descritivos dos Processos Sedimentológicos e Morfológicos em escoamentos com superfície livre.

Palavras-chave: Processos Sedimentológicos e Morfológicos. Rio São Francisco. Sensoriamento Remoto.

HYDROSYSEDIMENTOLOGICAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF A STRAIGH OF SÃO FRANCISCO RIVER, BRAZIL

Abstract: This paper describes the hydrodynamic, sedimentological and morphological characteristics observed in a 10 km stretch of São Francisco River, in the border of Minas Gerais and Bahia states, downstream the junction of the Verde Grande River, Brazil. They are outcomes of a thorough field analysis and HEC-RAS software, Sensing Remote and GIS applications. These

analysis result from a field visit during the dry season when the cliffs, beaches, sandbanks, inlets and islands are exposed and accessible, allowing the tracking of the sediment trajectories and the understanding of the morphological formation and deposits evolution. The main objectives of the paper are: (i) the knowledge of the values of the hydro-sedimentological variables; (ii) study of hydrodynamic scenarios, simulated varying the water discharge, the slope of the longitudinal water line and the roughness of the riverbed; (iii) the use of LANDSAT-5 TM satellite images to analyze the river's margins and sediment banks evolutions, and (iv) the understanding of the morphological formation and evolution of the solid deposits and their influence in the Navigation process and stability of the river stretch. The methodology, equipment, the region and particularities of the sediment deposits are described, thoroughly illustrated and compared with classical patterns in the literature. It is concluded that satellite images accurately describe the temporal evolution mobile banks and river margins. In-situ measurements and the use of satellite images are proposed for calibration and validation of descriptive models of the Sedimentological and Morphological Processes in open channel flows.

Keywords: Sedimentological and Morphological Processes. São Francisco River. Remote sensing.

INTRODUÇÃO

Os estudos hidrossedimentológicos descritos neste artigo foram realizados para fornecer subsídios técnicos à seleção de alternativas de tomada d'água no Rio São Francisco para o Projeto de Irrigação Iuiú no Estado da Bahia, próximo à divisa com Minas Gerais (Wilson-Jr. 2000).

Duas fases são interativas nos escoamentos com superfície livre: a fase líquida, contínua, regida pelas equações hidrodinâmicas da Mecânica dos Fluidos e a fase sólida, composta pelas partículas de sedimentos que se movimentam em contato com o leito do rio, ou em

suspensão no meio do escoamento turbulento (Wilson-Jr. 2009).

O movimento incipiente dos sedimentos nos leitos dos cursos d'água ou em suas bacias hidrográficas, o seu transporte, a dispersão e deposição dos grãos, caracterizam os processos sedimentológicos. Estes estão associados aos processos morfológicos, que consistem de alterações das características geométricas dos cursos d'água, em consequência de rupturas no equilíbrio dinâmico do movimento de sedimentos (Motta, 1978). Nos rios, estuários e canais navegáveis, uma alteração muito comum é a variação das posições e dimensões dos bancos de areia, causa de interferências

onerosas para o funcionamento do Sistema Hidroviário.

Quando os grãos sólidos do leito de um escoamento possuem propriedades idênticas às daquelas dos grãos que estão em movimento, o leito denomina-se aluvial. A forma e as dimensões dos sedimentos são determinadas por uma condição de equilíbrio entre a alimentação sólida a montante e a capacidade de transporte das vazões líquidas. Nos trechos aluviais, o equilíbrio sedimentológico poderá ser alcançado: um equilíbrio dinâmico que dependerá da extensão do trecho e do período de tempo considerados, os quais definem as escalas – espacial e temporal – do processo morfológico.

Quando a massa de sedimentos que penetra num trecho do escoamento for igual à massa que o deixa num determinado período de tempo, diz-se que o equilíbrio sedimentológico foi alcançado. Todavia, em trechos em equilíbrio, fenômenos naturais e antrópicos de desequilíbrio ocorrem durante o ciclo hidrológico, tais como: formação de praias nas margens e de bancos de areia no leito, erosões e deposições sólidas, arrombados e formação de braços mortos, solapamento das margens, geração de configurações de fundo e meandramento.

Interferências antrópicas no leito do rio e na bacia hidrográfica se adicionam

a estes fenômenos, as quais devem ser diagnosticadas e controladas, uma vez que elas modificam as condições de equilíbrio do trecho, com consequências severas para o Meio Ambiente, Obras Cíveis e Projetos de Engenharia em geral (Vieira da Silva e Wilson-Jr. 2005).

Princípio do Auto Ajustamento

O equilíbrio sedimentológico, também chamado de equilíbrio de regime ou dinâmico, é regido pelo Princípio do Auto Ajustamento, o qual estabelece que, num trecho de rio em terreno aluvial, sujeito principalmente a escoamentos unidirecionais, existe uma relação unívoca entre as variáveis independentes: vazões líquida (Q) e sólida (Q_b), e as variáveis dependentes: largura (B), profundidade (h) e declividade (S) médias do trecho.

O conceito do Auto Ajustamento foi inicialmente estabelecido para canais de irrigação, projetados para funcionarem com vazão constante. Posteriormente, o conceito foi generalizado para rios sujeitos a vazão não permanente durante o ciclo hidrológico e comportando um quarto grau de liberdade: o de formar meandros (Motta, 1978). Mas existe ainda um quinto grau de liberdade, pois o escoamento possui a capacidade de esculpir ou moldar no leito móvel, configurações de fundo, do

tipo leito plano, ondulado, com rugas e/ou dunas, entre outras.

Os meandros podem ser definidos pelo seu comprimento de onda (λ), que corresponde à distância média entre duas curvas consecutivas do mesmo lado do escoamento, e as formas de fundo por sua amplitude média (hd), igual à distância média entre a crista e o cavado das configurações.

Resumindo, nas aplicações do Princípio do Auto Ajustamento, as vazões, líquida e sólida, são as variáveis independentes, enquanto as variáveis dependentes são: a largura, profundidade, declividade do trecho, comprimento de onda dos meandros e a amplitude das configurações de fundo. Caso uma variável dependente sofra uma alteração e as grandezas independentes permaneçam constantes, o escoamento tenderá restituir à grandeza alterada, seu valor original de equilíbrio. Contrariamente, se a grandeza alterada for uma variável independente, as grandezas dependentes tenderão a se ajustar às novas imposições, em busca de novas condições de equilíbrio.

Sem dúvida, este é um conceito valioso para o Prognóstico das modificações morfológicas que poderão ocorrer nos trechos de rios sujeitos a interferências naturais e antrópicas, e para a programação de obras de

estabelecimento e manutenção de vias navegáveis.

Relação de Proporcionalidade de Lane (1955)

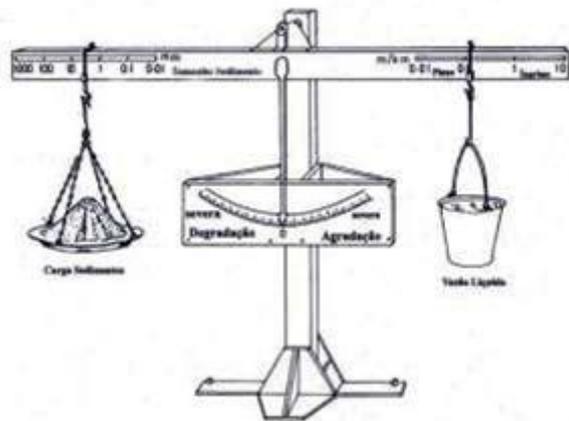
Segundo Lane (1955) existe uma relação de proporcionalidade entre as características sedimentológicas do trecho do rio estudado, representadas pela descarga sólida do material do leito (Q_b) e o diâmetro mediano das partículas de sedimentos (D_{50}), e as características hidrodinâmicas, representadas pela vazão líquida (Q) e a declividade da linha d'água (S_0). Tem-se:

$$Q_b \times D_{50} = k \times Q \times S_0 \quad (1)$$

Trata-se de uma equação de equilíbrio, onde k é um coeficiente dimensional de proporcionalidade, muito utilizada em Estudos de Impactos Ambientais e edição de Relatórios dos Impactos sobre o Meio Ambiente (EIA-RIMA) de obras hidráulicas. Ela fornece rapidamente um prognóstico qualitativo hidrossedimentológico e morfológico de trechos de rios submetidos a ações naturais e antrópicas. Caso uma das quatro variáveis da equação seja modificada, a equação indicará as mudanças que serão necessárias, em uma ou mais das três variáveis restantes, para o restabelecimento do equilíbrio, o que

poderá ser realizado naturalmente ou pela ação humana. O sucesso da equação deve-se à confecção da Figura 1, que por sua excelência didática, tem sido aplicada com segurança, por técnicos dos Meios Físico, Biótico e Socioeconômico.

Figura 1 - Equilíbrio sedimentológico em escoamentos fluviais



Fonte: Vieira da Silva e Wilson-Jr. 2005.

Estabilidade de um trecho de rio

O prognóstico da evolução morfológica dos trechos fluviais, devido às interferências naturais e antrópicas, fica facilitado ao se considerar as possíveis modificações impostas às variáveis independentes e dependentes, a partir das relações qualitativas apresentadas por Schumm (1960):

$$Q \propto B, h, \lambda \quad (2)$$

$$Q \propto B, S, \lambda \quad (3)$$

h,P

onde: P é o coeficiente de sinuosidade do escoamento, definido como a razão entre os comprimentos do curso d'água e do vale fluvial; λ é o comprimento de onda dos meandros e S é a declividade longitudinal da linha de energia. Outras variáveis poderiam também ser consideradas, tais como: hd, amplitude das formas de fundo; F, razão entre a largura e a profundidade do curso d'água; M, porcentagem de argila e silte presentes no leito do escoamento.

Relações quantitativas deste tipo só podem ser obtidas através de uma metodologia que englobe observações e medições de campo sistemáticas, tanto hidrodinâmicas, quanto sedimentológicas e morfológicas, durante pelo menos um ciclo hidrológico. Entretanto, como relações qualitativas, elas são fundamentais para o estudo das suscetibilidades dos trechos à erosão e ao assoreamento, ou seja, às variações morfológicas.

A Figura 2 mostra as consequências das variações simultâneas das variáveis independentes (Q e Qb) sobre a morfologia fluvial. Os símbolos \uparrow

e \downarrow indicam aumentos e diminuições das variáveis devido às interferências naturais e antrópicas no trecho dos escoamentos

(Schumm, 1960; Vieira da Silva e Wilson-Jr. 2005).

Figura 2 - Tendências morfológicas de trechos de rios em função das variáveis independentes

| | Largura B | Profundi- dade h | Meandros A | Declivida- de S | Sinuosida- de P | Razão F B/h |
|---|--------------|------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| CASO I. (Curso d'água normal, aumento da produção sólida na bacia hidrográfica) | | | | | | |
| Vazão Líquida, Q | | | | | | |
| Descarga Sólida, Q _s | | | | | | |
| CASO II. (Montante de barragem, confluência com rio de maior porte, entrada de lago e baía) | | | | | | |
| Vazão Líquida, Q | | | | | | |
| Descarga Sólida, Q _s | | | | | | |
| CASO III. (Lago e reservatório com retenção de sedimentos e alimentação da água de outra fonte) | | | | | | |
| Vazão Líquida, Q | | | | | | |
| Descarga Sólida, Q _s | | | | | | |
| CASO IV. (Distribuição de água para irrigação, mineração e aumento da produção de sedimentos devido à exploração agrícola, por exemplo) | | | | | | |
| Vazão Líquida, Q | | | | | | |
| Descarga Sólida, Q _s | | | | | | |

Fonte: Schumm 1960.

MATERIAL E MÉTODOS

Wilson-Jr. e Vukmirović (1980) e Wilson-Jr. (2009) desenvolveram uma metodologia para as descrições, qualitativa e quantitativa, do movimento de sedimentos em escoamentos com superfície livre, com realização de medições topobatimétricas, hidrossedimentométricas, uso de traçadores e técnicas de Sensoriamento Remoto. De acordo com a metodologia, para a análise do movimento de sedimentos são necessárias três etapas: (i) Conhecimento da bacia hidrográfica. (ii) Medições na natureza do movimento sólido, num trecho representativo do escoamento, e durante a realização dessas medições, (iii) determinação das

propriedades hidrossedimentológicas, morfológicas e hi-drometeorológicas dessa parte representativa da bacia hidrográfica. Essas etapas foram detalhadas em Wilson-Jr. & Souza e Silva, 2016 durante o I SBHSF, e resumidas na **Figura 3**, a seguir.

Figura 3. Movimento de sedimentos em escoamentos com superfície livre (Wilson-Jr. 2009)



Alugou-se no local um barco de alumínio de 5,0 m de comprimento, equipado com um motor de popa de 15 HP, e com equipamentos (**Figura 4**) para as medições hidrossedimentológicas e levantamentos geográfico e morfológico do trecho do rio. Os contornos do trecho do Rio São Francisco foram obtidos navegando-se o mais próximo possível das margens, com utilização de aparelhos portáteis de posicionamento geográfico, GPS marcas Garmin e Magellan (Wilson-Jr., 2000).

Nos baixios, o motor de popa era levantado e o deslocamento feito,

lentamente, a remo. Nos bancos e ilhas formados de sedimentos já consolidados, os levantamentos geográfico e morfológico foram feitos por terra, caminhando-se em torno das praias, bancos e ilhas, e na Barra do Rio Verde Grande. Várias vezes, principalmente junto aos bancos e ilhas, o mestre do barco entrou na água e empurrou o barco várias dezenas de metros, enquanto se realizava o levantamento à pé, como ilustrado nas **Figuras 6 e 7**, respectivamente.

Figura 4. Trecho de tomada d'água do Rio São Francisco para o Projeto de Irrigação Iuiú (Guimarães e Wilson-Jr. 2002)



O produto final dos levantamentos foi uma carta geográfica detalhada do trecho do Rio São Francisco, de 10,0 km de extensão a jusante da Foz do Rio Verde Grande, parte da qual constitui a **Figura 8**

deste artigo. Esta carta é um fiel levantamento do trecho durante o período seco do ano 2000. Nas **Figuras 8 e 9** e na **Tabela 1** estão anotadas as cotas dos níveis d'água ao longo do rio e nas seções das Alternativas 1 e 4 de Tomada d'Água do Projeto Iuiú (Wilson-Jr. 2000).

Figura 5. Medições hidrossedimentológicas e morfo-lógicas. (Wilson-Jr., 2000)



Figura 6. Deslocamento do barco à vau nas proximidades das ilhas e bancos de sedimentos (Wilson-Jr., 2000)

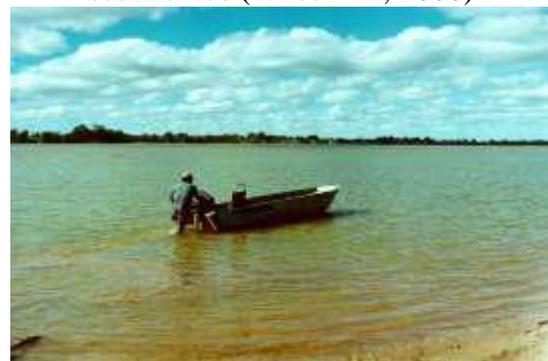


Figura 7. Levantamentos geográfico e morfológico dos bancos de areia e ilhas (Wilson-Jr., 2000)

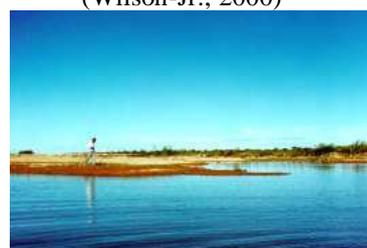


Figura 8. Carta do trecho das alternativas de tomada d'água do Rio São Francisco para Projeto de Irrigação Iuiú (Wilson-Jr., 2000)

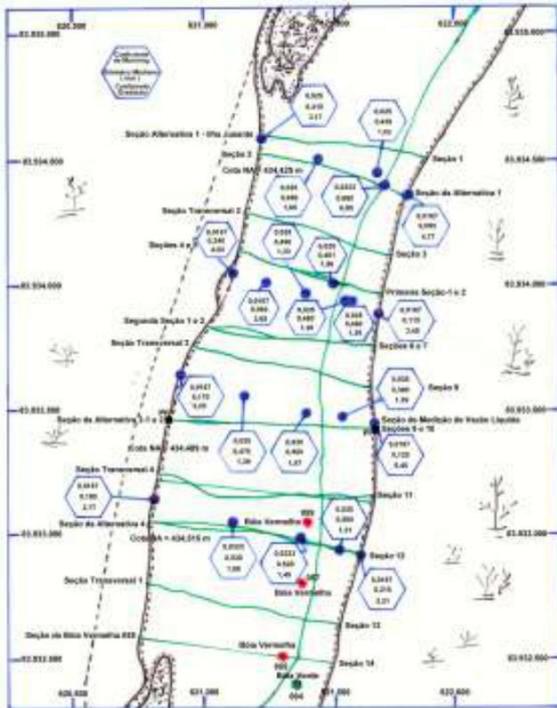


Figura 9. Cotas do nível d'água do Rio São Francisco ao longo do trecho de tomad d'água do Projeto Iuiú (Wilson-Jr., 2000)

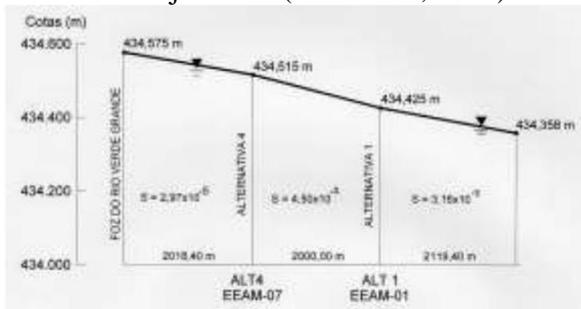


Tabela 1 – Cotas históricas do Rio São Francisco no trecho das alternativas de tomada d'água (Wilson-Jr, 2000)

| | |
|---|-----------|
| <u>Margem Direita</u> | |
| Cheia Máxima de 1979: | 443,399 m |
| Cheia Máxima de 1992: | 439,399 m |
| <u>Margem Esquerda</u> | |
| Telhado da Casa do Sr. Waldemir Batista, na altura da Alternativa 2 | 445,247 m |

OBJETIVOS PRINCIPAIS DO ARTIGO

1. Mostrar que os levantamentos morfológicos de um trecho do Rio São Francisco, incluindo seus bancos móveis, podem ser realizados com o uso de imagens satélite de média resolução (30,0 m) do tipo LANDSAT-5 TM, que são disponibilizadas gratuitamente pelo INPE, desde 1984.
2. Utilizar as imagens para análise da evolução temporal desses bancos e margens do trecho do rio.
3. Mostrar que o uso de imagens LANDSAT-5 TM e de alta resolução (1,0 m) deve ser inserido na metodologia descritiva do movimento de sedimentos em escoamentos com superfície livre nas etapas de Conhecimento da Bacia Hidrográfica e de Medições Especiais (Etapas 1 e 2) no trecho representativo do escoamento.
4. Adotar os resultados obtidos para calibração e validação de modelos qualitativos e quantitativos do movimento de sedimentos neste e demais trechos do rio e da bacia hidrográfica.

CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO TRECHO DO RIO SÃO FRANCISCO

Os levantamentos de campo, durante a estação seca, permitiram conhecer o material depositado na calha e margens do rio, e a dinâmica do movimento dos sedimentos. Descreveram-se os processos sedimentológicos, a formação e evolução dos bancos, ilhas e praias, assim como as tendências de desequilíbrio sedimentológico manifestadas no trecho das alternativas de tomada d'água. Os dados do estudo foram obtidos através dos seguintes levantamentos dos: (i) Contornos do trecho, i.e., das margens, bancos e ilhas, com GPS. (ii) Perfis de 14 seções transversais, com sondas ecobatimétricas e posicionamento GPS. (iii) Registros batimétricos das configurações de fundo. (iv) Medições hidrossedimentométricas com equipamentos tradicionais de medições e amostragens.

Seções Transversais

Realizaram-se quatorze levantamentos batimétricos transversais e um longitudinal, cujas trajetórias foram reproduzidas na **Figura 8**.

As identificações das seções transversais no lado esquerdo do desenho do rio correspondem às numerações de campo, e as do lado direito às adotadas para uso do HEC-RAS. As alternativas de

tomada d'água do Projeto Iuiú também estão ilustradas nesta figura e na **Figura 10**. Nas **Figuras 11 e 12** apresentam-se os perfis transversais das seções das extremidades: montante e jusante do trecho das alternativas de tomada d'água, onde se concentraram as medições hidrossedimentométricas, durante a visita de conhecimento da região. Levantaram-se 14 perfis transversais. Como exemplo, apresenta-se na **Figura 14**, uma foto da seção da Alternativa 3, onde se concentraram as medições de vazão líquida e coleta de sedimentos do leito e em suspensão (Wilson-Jr. 2000).

Figura 10. Alternativas de tomada d'água do Projeto Iuiú e bancos de sedimentos (Souza e Silva, 2013)

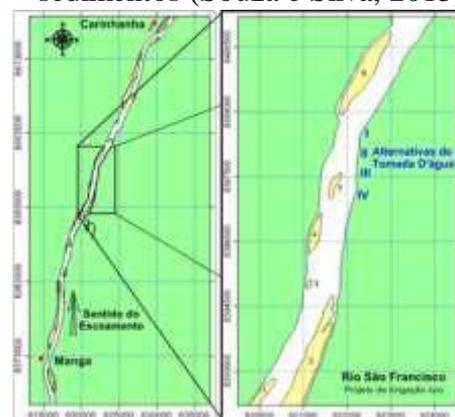


Figura 11. Seção 14 ou da Boia 055, montante do trecho (Wilson-Jr. 2000)

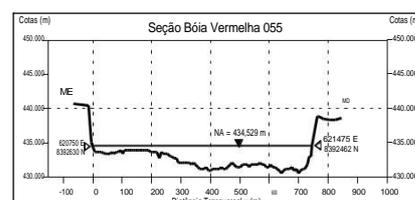


Figura 12. Seção 1, extremidade a jusante do trecho (Wilson-Jr. 2000)

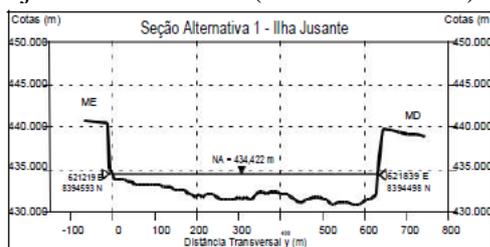


Figura 13. Trecho 3D do Projeto Iuiú (Wilson-Jr. 2000)

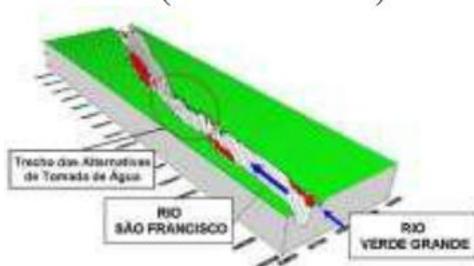


Figura 14. Seção Alternativa 3, de Monitoramento (Wilson-Jr. 2000)



Aplicações do HEC-RAS

O aplicativo HEC-RAS foi desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* para o estudo unidimensional de escoamentos com superfície livre sobre leitos fixos. O procedimento de cálculo baseia-se na solução unidimensional da equação da energia. As hipóteses básicas e simplificadoras são: (i) escoamento 1-D permanente e gradualmente variado; (ii) leito fixo; (iii) declividades longi-tudinais

reduzidas da linha d'água (**Figura 9**); (iv) perda de energia por atrito dada pela Equação de Manning; (v) fluido incompressível e homogêneo; e (vi) influências térmicas e eólicas desprezíveis (USACE, 1997). A aplicação do HEC-RAS envolveu três fases: **duas calibrações e uma simulação.**

Na **Primeira Fase de Calibração**, reproduziu-se o perfil longitudinal da superfície livre, utilizando-se coeficientes de resistência obtidos em função da granulometria do material amostrado na calha do rio. Como os resultados obtidos não reproduziram corretamente os níveis de água observados nas 14 seções transversais do trecho (**Figura 8**), uma segunda fase foi necessária.

Na **Segunda Fase de Calibração** determinaram-se, para os valores granulométricos do sedimento do leito e para cada seção, os coeficientes de Manning que melhor reproduzissem os valores das variáveis hidrodinâmicas medidas no campo. A **Tabela 2** reproduz uma saída de dados do HEC-RAS mostrando, p.e., que os valores simulados para a Seção 9 ou da Alternativa 3 (**Figuras 8 e 14**) se ajustaram aos valores medidos *in-situ* (Guimarães e Wilson-Jr. 2002).

Na **Terceira Fase, de Simulações**, foram criados **Cenários** possíveis de ocor-

rer durante o ciclo hidrológico, variando-se os valores da declividade da linha d'água, do coeficiente de resistência e considerando-se as seguintes vazões líquidas: 1.045,20; 2.000,00; 5.000,00; 8.000,00 e 12.000,00 m³/s. Para as duas primeiras vazões, ao contrário das demais, não há inundação. O extravasamento da calha se inicia, em algumas seções do trecho, para $Q \geq 5.000,00$ m³/s.

Tabela 2 - Valores das Variáveis medidas na Seção 9 e calibradas com o HEC-RAS (Guimarães e Wilson-Jr. 2002)

| Variables | Units | Measured | Calibrated |
|-----------------------|---------------------|----------|------------|
| Water Discharge | m ³ /s | 1,045.20 | 1,045.20 |
| Water Level Elevation | m | 434.489 | 434.49 |
| Upper Section Width | m | 789.08 | 777.67 |
| Flow Area | m ² | 1,566.65 | 1,477.73 |
| Wet Perimeter | m | 789.64 | 778.34 |
| Hydraulic Radius | m | 1.984 | 1.90 |
| Flow Velocity | m/s | 0.667 | 0.71 |
| Manning Coefficient | m ^{-1/3} s | 0.0159 | 0.0167 |
| Channel Slope | cm/km | 4.50 | 4.50 |
| Shear Stress | N/m ² | 0.876 | 1.10 |
| Froude Number | | 0.15 | 0.16 |

Nas Figuras 15 e 16 apresentam-se os perfis longitudinais da superfície livre, desde a **seção 14**, à esquerda das figuras e a montante do trecho do rio, até a **seção 1**, à direita das figuras e a jusante do escoamento. A **Figura 15** mostra resultados para vazões da estação seca, com o escoamento contido na calha do rio, enquanto os resultados da **Figura 16** correspondem aos valores de $Q \geq 5.000,00$, que representam situações de

extravasamento e inundação das planícies ribeirinhas.

Figura 15 - Perfis longitudinais para $Q \leq 2.000,00$ m³/s, período seco. Condições de contorno: Níveis de água nas seções 1 e 14 (Guimarães e Wilson-Jr., 2002)

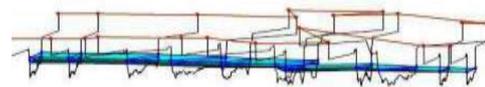
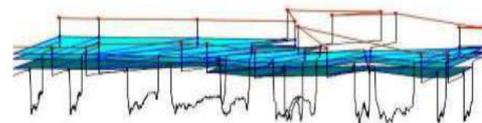


Figura 16 – Perfis longitudinais para $Q = 5.000,00$; $8.000,00$ e $12.000,00$ m³/s, e $S = 9,0 \times 10^{-5}$. Período chuvoso (Guimarães e Wilson-Jr., 2002)



Uso da Técnica de Sensoriamento Remoto

Souza e Silva (2013) mostrou que as imagens do tipo LANDSAT-5 TM possuem resolução suficiente para reproduzir os contornos das margens e bancos de sedimentos de um trecho de rio do porte do São Francisco, na região do Projeto Iuiú, com discrepância máxima, entre as áreas levantadas no campo e a partir da imagem satélite inferior a 7 %.

Para se avaliar a evolução morfológica do trecho do Projeto Iuiú foram utilizadas 26 imagens de satélite do perío-

do de estiagem, obtidas durante os anos de 1985 a 2011 (**Figura 17**). Somente o ano de 2002 não foi considerado no estudo, por não ter apresentado uma boa imagem LANDSAT-5 durante a estação seca. Após as etapas iniciais do tratamento de imagens: georeferenciamento, redimensionamento e digitação dos contornos, as formas dos bancos e ilhas foram analisadas. Constatou-se que alguns bancos de sedimentos são intermitentes, outros são permanentes; que alguns se alongaram ou migraram para jusante, enquanto outros permaneceram na mesma posição, mas sujei-tos a modificações morfológicas anuais.

Considerando-se as variações morfológicas dos bancos de sedimentos (Figura 18), e constatações de campo de Wilson-Jr. (2000), concluiu-se que (Wilson-Jr. & Souza e Silva, 2016):

1. O Banco 1 (**Figura 10**) pode ser considerado permanente, embora só tenha sido identificado somente em 2001, quando passou a se deslocar dentro dos limites da carta. De 2001 a 2009 apresentou um crescimento gradativo anual, que se estabilizou em torno de 1,3% da área seca total.
2. Os ribeirinhos consideram que a margem direita do rio é mais estável que a margem esquerda (Wilson-Jr. 2000).

De fato, além de ser mais elevada, a margem direita apresenta um só banco de sedimentos: o Banco 2, formado na foz do Rio Verde Grande. No período de 1985 a 1998, constatou-se um aumento gradativo desta barra, no interior do Rio São Francisco. Nos anos subsequentes, ela se manteve estável, ocupando cerca de 10% da área seca total do trecho.

3. Os Bancos 3 e 5 surgiram em épocas distintas no trecho e desapareceram nos anos seguintes. O Banco 5 permaneceu por um tempo mais longo, durante o período de 1993 a 1996, e sua última aparição foi no ano de 2001. Os comportamentos destes bancos merecem uma análise minuciosa. É provável que se relacionem diretamente com as interferências antrópicas que ocorrem nas Bacias Hidrográficas dos Rios São Francisco e Verde Grande, que se acentuaram após 2011.
4. Os Bancos 4 e 6 são permanentes e clássicos em trechos semelhantes ao da foz do Rio Verde Grande (Wilson-Jr, 2000; Yang, 2003). Apresentaram um crescimento gradativo até o início do século e mantiveram as áreas secas constantes até 2011. Os valores percentuais em relação à área seca total do trecho cresceram de 2,5 % a 8,0 %, quando se estabilizaram.

5. Nenhuma alteração significativa foi constatada nas margens do trecho, nesses 27 anos. No entanto, teme-se que desde então tenham ocorrido variações mais acentuadas e graves, devido à ocupação e uso do solo no Norte de Minas Gerais.

Figura 17 - Dados estatísticos das vazões líquidas do Rio São Francisco em Manga, durante os períodos entre as Imagens de Satélite (Souza e Silva, 2013)

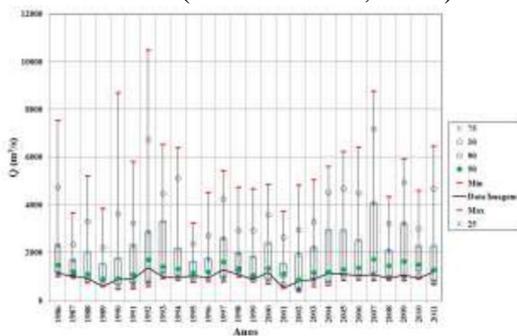
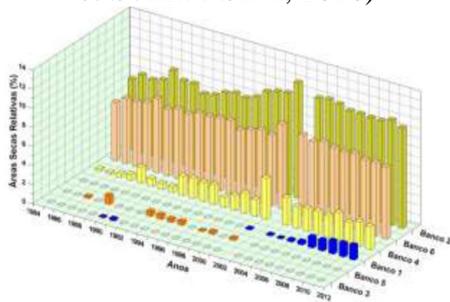


Figura 18 - Evoluções dos bancos de sedimentos do trecho do Rio São Francisco, de 1985 a 2011 (Wilson-Jr. & Souza e Silva, 2016)



CONCLUSÕES

A morfologia do Rio São Francisco no trecho do Projeto Iuiú é semelhante ao desenho esquematizado por Yang (2003), reproduzido na **Figura 19**. Ele ilustra os

depósitos sólidos no rio principal, nas partes convexas das curvas, na confluência com o tributário, e alternadamente próximo às margens, com formação de meandros (**Figura 20**). Durante os períodos de águas médias e baixas, ilhas arenosas e de sedimentos coesivos se formam: são os estoques de sedimentos do rio. Estes depósitos formam um solo fértil, e por isto as ilhas e bancos são cultivados pelos ribeirinhos para subsistência familiar, de forma intermitente.

Os modelos hidrodinâmicos, como o HEC-HAS e o uso de Sensoriamento Remoto são ferramentas essenciais para os estudos dos Processos Sedimentológicos e Morfológicos em escoamentos com superfície livre. Além da visão comum das margens, limitada no tempo e no espaço, o observador possui a mais, uma visão dinâmica em perspectiva, e de topo, ampla e detalhada da bacia hidrográfica, do trecho do rio e mesmo do fundo do rio. Com as **imprescindíveis** visitas e medições de campo, os modelos hidrodinâmicos, sedimentológicos e morfológicos são calibrados e validados, e só então podem ser aplicados para o prognóstico de cenários críticos de inundações (vazões máximas de inundação), de seca (mínimas) e geradores do leito e da paisagem (vazões

dominantes).

Figura 19 - Depósitos de sedimentos num trecho de um rio a jusante de seu tributário (Yang, 2003)

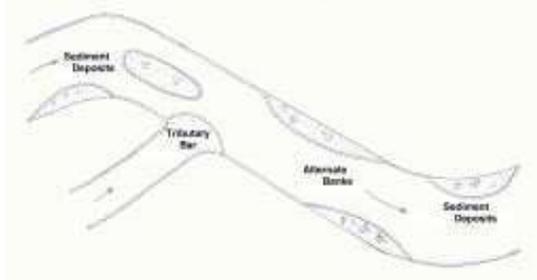
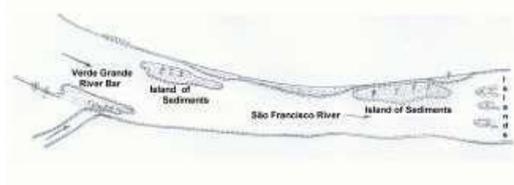


Figura 20 - Bancos de sedimentos no trecho do Projeto Iuiú a jusante do Rio Verde Grande (Wilson-Jr., 2000)



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Engenharia Oceânica da COPPE-UFRJ pelo apoio institucional recebido, e ao Eng. Geraldo Godinho Pinto pelos levantamentos de campo, à Dra. Márcia Maria Guimarães pelas aplicações do HEC-HAS, e ao M.Sc. Mário Grüne de Souza e Silva pelo Tratamento das Imagens de Satélite.

REFERÊNCIAS

GUIMARÃES, M.M.; WILSON-JR., G. (2002). **Uso do modelo HEC-HAS para estudos hidrodinâmicos e sedimentológicos num trecho do Rio São Francisco**. V ENES, v. 1, p. 219-235. São Paulo, SP, 2002.

LANE, E.W. The importance of fluvial morphology in Hydraulic Engineering. **Proceedings of the ASCE**, v. 84, n. 745, 1955.

MOTTA, V.F. **Processos sedimentológicos e morfológicos em estuários**. *Nota Técnica*. AECO/PENO/COPPE/UFRJ. 9p. RJ, 1978.

SCHUMM, S.A. **The shape of alluvial channels in relation to sediment type**. U.S. Geological Survey Prof. Paper 352-B, p. 17-30. USA, 1960.

SOUZA e SILVA, M.G. **Análise de processos hidrossedimentológicos em escoamentos com superfície livre: trecho do projeto de irrigação Iuiú no Rio São Francisco**. Dissertação de M.Sc. PENO/COPPE/UFRJ. Brasil, 2013.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **HEC-RAS: River analysis system. User's Manual, Hydraulic Reference Manual, Applications Guide**. Davis, CA. 1997.

VIEIRA DA SILVA, R.C.; WILSON-JR., G. **Hidráulica fluvial II**. Ed. COPPE-UFRJ, 255 p. il., RJ, Brasil, 2005

WILSON-JR., G. **Estudos hidráulicos e sedimentológicos referentes às alternativas de tomada d'água do Rio São Francisco para o Projeto de Irrigação Iuiú**. COPPETEC-PENO-UFRJ. v.1, 198 p.il. RJ, 2000.

WILSON-JR., G. **Evolução morfológica de trechos hidroviários.** 6º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior. SOBENA. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

WILSON-JR., G.; SOUZA e SILVA, M.G. **Evolução morfológica de bancos de sedimentos do Rio São Francisco. I SBHSF – I Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.** Juazeiro, BA-Petrolina, PE, Brasil, 2016.

WILSON-JR., G.; VUKMIROVIĆ, V. **Sediment transport on the Ivaí River,**

Brazil. *Symposium on River Engineering and its Interaction with Hydrological and Hydraulic Research.* IARH, Belgrade, Yugoslavia, 1980.

YANG, C.T. **Sediment transport: theory and practice.** 2. ed. The McGraw-Hill, 396 p., NY, USA, 2003.