



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS



GEF
Fundação para o
Meio Ambiente Mundial



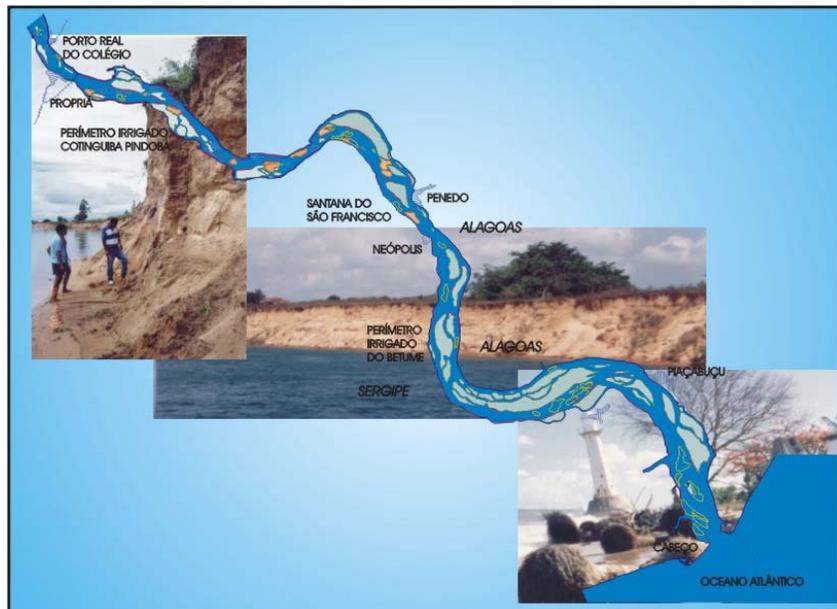
PNUMA
Programa das Nações Unidas
para o Meio Ambiente



OEA
Organização dos
Estados Americanos

PROJETO DE GERENCIAMENTO INTEGRADO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM TERRA NA BACIA DO SÃO FRANCISCO ANA/GEF/PNUMA/OEA

Subprojeto 2.4 - Estudo do Processo Erosivo das Margens do Baixo São Francisco e seus Efeitos na Dinâmica de Sedimentação do Rio



Resumo Executivo do Relatório Final

ESTUDO DO PROCESSO EROSIVO DAS MARGENS DO BAIXO SÃO FRANCISCO E SEUS EFEITOS NA DINÂMICA DE SEDIMENTAÇÃO DO RIO

Universidade
Federal de Sergipe



Fundação de
Apoio a Pesquisa e
Extensão de Sergipe

Aracaju - SE

**PROJETO DE GERENCIAMENTO INTEGRADO DAS
ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM TERRA
NA BACIA DO SÃO FRANCISCO
ANA/GEF/PNUMA/OEA**

**Subprojeto 2.4 – Estudo do Processo Erosivo das Margens do Baixo São
Francisco e seus Efeitos na Dinâmica de Sedimentação do Rio**

Resumo Executivo do Relatório Final

**ESTUDO DO PROCESSO EROSIVO DAS MARGENS DO
BAIXO SÃO FRANCISCO E SEUS EFEITOS NA
DINÂMICA DE SEDIMENTAÇÃO DO RIO**

Coordenação do Subprojeto

Luiz Carlos da Silveira Fontes
Departamento de Engenharia Agrônômica
Universidade Federal de Sergipe

Pesquisadores Participantes

Francisco Sandro Rodrigues Holanda	UFS
Ana Patrícia Barreto Casado	UFS
Cícero Marques dos Santos	UFS
Edgardo Emanuel Latrubesse	UFG
Sandra Baptista Cunha	UFF

Abril de 2003

INTRODUÇÃO

O presente relatório apresenta os resultados obtidos pelo subprojeto 2.4 – Estudo do processo erosivo das margens do Baixo São Francisco e seus efeitos na dinâmica de sedimentação do rio, como parte do Projeto GEF São Francisco, executado e coordenado pela Universidade Federal de Sergipe, em parceria com a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe e a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba.

A área estudada pertence à Bacia Hidrográfica do rio São Francisco, mais precisamente à região fisiográfica do Baixo São Francisco (Figura 1). O objeto de estudo foi o canal do baixo curso do rio São Francisco e as suas margens, no trecho compreendido entre a cidade de Propriá (Sergipe), na divisa entre os Estados de Sergipe e Alagoas, e a sua foz, no Oceano Atlântico, com uma extensão aproximada de 75 quilômetros.



Figura 1. Subdivisões fisiográficas da Bacia do São Francisco (CODEVASF, 2002)

decorrentes da construção e operação do complexo de barragens no rio São Francisco e o desencadeamento de processos de erosão marginal acelerada no seu baixo curso, entre a cidade de Propriá e a foz, relacionando-as com os impactos sobre o meio antrópico.

Para alcançar tais objetivos, o subprojeto desenvolveu-se em duas fases: Fase 1: Análise da evolução histórica do rio e dos impactos gerados pelos barramentos sobre a morfologia do canal; Fase 2: Estudo da distribuição e causas da erosão marginal

O relatório aborda tanto temas incluídos na fase 1 quanto na fase 2 do subprojeto 2.4, enfocando desde o estudo detalhado do trecho sob erosão marginal ao longo do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba até uma visão mais abrangente, ao enfatizar o comportamento morfodinâmico do baixo curso do rio São Francisco.

Entretanto, a análise do comportamento atual da dinâmica fluvial se estendeu até a barragem de Xingó, em Canindé do São Francisco, distante aproximadamente 240 km da Foz. Para efeito das discussões contidas no presente relatório considera-se o atual baixo curso do rio São Francisco, o estirão compreendido entre a Barragem de Xingó e a foz.

Um trecho da margem direita (margem sergipana) do rio São Francisco, com extensão de 11 km, localizado na área do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba (Município de Propriá), foi estudado em maior detalhe, incluindo monitoramento e quantificação da erosão e estudos de estabilidade de taludes (Figura 2).

As pesquisas, cujos resultados ora são apresentados, tiveram por objetivo principal analisar as relações entre as mudanças de natureza hidrológica e geomorfológica

região apresenta a maior vulnerabilidade hidro-ambiental de toda a bacia do rio São Francisco em relação às mudanças introduzidas pela construção e operação das grandes barragens.

Inúmeros relatórios técnicos, Ministério da Integração Nacional (2000), CPERH (1997), CONSÓRCIO JAAKKO POYRY-TAHAL (2000) e trabalhos acadêmicos (Vargas, 1999, Holanda, 2000, Fontes, 2002) descrevem um preocupante quadro atual de degradação ambiental do ecossistema fluvial para o baixo curso do rio São Francisco e suas áreas marginais inundáveis e destacam as graves conseqüências socioeconômicas e culturais advindas das alterações no meio ambiente.

Estes trabalhos são unânimes em atribuir às políticas públicas de desenvolvimento regional e, em especial, a opção pelo modelo de desenvolvimento que prioriza o uso do rio como gerador de energia hidrelétrica e fornecedor de água para irrigação, em detrimento dos demais usos das suas águas, a responsabilidade maior por estes desequilíbrios.

Vargas (op. cit.) ressalta que a interação homem-meio passou a se alterar na região a partir do momento em que o ciclo natural do rio passou a ser interrompido pelas grandes barragens. Por exemplo, afetaram diretamente a atividade pesqueira tradicional, alterando os códigos de pescaria, bem como os utensílios e o período de pesca que abandonaram o cotidiano definido pelas forças cosmológicas da natureza e transportaram-se para os relatos do passado.

As barragens também são apontadas pela comunidade ribeirinha como as principais responsáveis pelas mudanças ambientais observadas nos últimos anos. Estas questões mobilizaram a sociedade sergipana e alagoana e ganharam grande repercussão na imprensa local e regional (Figura 3), sendo objeto de inúmeras entrevistas, palestras e debates sobre a situação ambiental do baixo São Francisco.



Figura 3. Montagem com matérias de jornais de Aracaju (Cinform, Correio de Sergipe e Jornal da Cidade) publicadas em 2001 e 2002.

As múltiplas demandas pelos recursos hídricos do rio São Francisco se configura como um típico quadro de conflito pelo uso das águas e entre desenvolvimento e meio ambiente. A operação dos reservatórios, centralizada na geração de energia e no fornecimento de água para irrigação, considerando marginal o atendimento de prioridades ecológicas, ao passo em que fomentou o desenvolvimento do nordeste, gerou um forte passivo ambiental e sócio-econômico.

Se o aproveitamento do potencial hidroenergético da bacia do São Francisco permitiu o desenvolvimento do parque industrial do Nordeste e da região como um todo, gerou, em contrapartida, alterações substanciais nos regimes fluviais e impactos negativos no ecossistema fluvial e na vida das populações ribeirinhas.

1.1. Após a construção das barragens, um quadro de degradação ambiental

Os problemas ambientais mais citados nas publicações e manifestações de técnicos, ribeirinhos e representantes da sociedade e do poder público, como relacionados direta ou indiretamente com os barramentos rio acima são sintetizados nos Quadros 1 e 2.

É importante ressaltar que a maior parte das mudanças relacionadas nos Quadros 1 e 2 é fruto de observações pessoais dos pesquisadores e ribeirinhos, o que lhes conferem credibilidade, mas que pode gerar, em vários casos, interpretações equivocadas, principalmente naquelas situações em que causas distintas podem levar a um mesmo resultado ambiental e afirmativas generalistas, sem a necessária comprovação.

Quadro 1. Síntese dos problemas ambientais mais citados nas publicações sobre o Baixo São Francisco como decorrentes dos barramentos rio acima na área do canal.

1. AREA DO CANAL

IMPACTOS AMBIENTAIS GEOMORFOLÓGICOS E OUTRAS MUDANÇAS NO MEIO FÍSICO

Diminuição da intensidade, frequência e, atualmente, ausência de cheias

- A maior parte das publicações atribuem às barragens a interrupção e até eliminação definitiva das cheias.
 - A população ribeirinha acredita que as cheias foram eliminadas pela barragem de Xingó, desde 1994.
-

Assoreamento do leito do rio

- rio mais raso (diminuição generalizada da profundidade média do rio).
 - surgimento de muitas “croas” (bancos de areias).
 - modificações na morfologia da calha fluvial.
 - redução na capacidade de transporte de partículas grosseiras.
-

Proliferação de focos de erosão nas margens

- erosão acelerada nas margens do rio e ilhas, com queda de barrancos e recuo das margens.
- instabilidade lateral da calha do rio São Francisco.

1. ÁREA DO CANAL

IMPACTOS AMBIENTAIS GEOMORFOLÓGICOS E OUTRAS MUDANÇAS NO MEIO FÍSICO

Diminuição do teor de nutrientes e partículas finas em suspensão no rio

- água liberada por Xingó tem baixa carga de nutrientes na maior parte do ano.
 - águas antes caracteristicamente turvas, barrentas, tornaram-se límpidas, com baixa carga de sedimentos em suspensão na maior parte do ano.
-

Erosão acelerada na margem direita (sul) da foz

- Modificação na dinâmica costeira.
 - Desequilíbrio entre processos marinhos e fluviais.
 - Deficiência no aporte de sedimentos (déficit de aporte de sedimentos).
 - Recuo da linha de costa, por erosão.
 - Destruição do povoado Cabeço (SE) pela erosão.
-

MUDANÇAS E CONSEQÜÊNCIAS DAS ALTERAÇÕES DO MEIO FÍSICO SOBRE O MEIO BIÓTICO E ANTRÓPICO

Pesca, pescados e pescadores

Mudanças no calendário de pesca

- Em termos sazonais e de horários mais propícios à pesca.
-

Mudanças nas técnicas de pesca

- Adequações às novas condições do rio e de mudanças do tipo e quantidade de pescado.
 - O desenvolvimento da macrófita denominada “cabelo” é apontado como um dos problemas para a pesca, dado que dificulta o uso de redes de malhar e serve como habitat favorito de predadores como a piranha e o tucunaré.
-

Mudanças na qualidade do pescado

- Diminuição do peso e comprimento. Peixes e camarões atualmente pescados diminuíram em peso e comprimento em relação à situação anterior.
-

Mudanças na quantidade de recursos pesqueiros

- Diminuição na quantidade de pescados, sobretudo as espécies mais nobres.
- Diminuição da quantidade absoluta de peixes e camarões.
- Espécies mais procuradas, como o Surubim e o camarão Pitu, diminuíram drasticamente de quantidade.
- No passado, o BSF era reconhecido pela abundante produção de peixes e crustáceos e era considerado a de maior produção de todo o Vale.

MUDANÇAS E CONSEQÜÊNCIAS DAS ALTERAÇÕES DO MEIO FÍSICO SOBRE O MEIO BIÓTICO E ANTRÓPICO

Mudanças nas relações sócioeconômicas:

- Perda de interesse dos mais jovens pela profissão.
 - Diminuição drástica da renda dos pescadores.
 - Marginalização da atividade pesqueira artesanal, restringindo-a a uma atividade secundária e pouco remunerada.
 - Distinção entre piscicultores e pescadores artesanais profissionais.
 - Surgimento de alguns conflitos entre piscicultores e pescadores.
-

Incentivo à pesca predatória e a sobre-exploração

- Uso intensivo de armadilhas para camarões em quantidade bem superiores às praticadas anteriormente.
 - Esforço de pesca cada vez maior para se obter quantidades cada vez menores, que garantam um mínimo de remuneração, ameaça superar a capacidade de recuperação do ecossistema. O resultado leva também à redução dos estoques naturais de peixes e camarões.
 - A drástica diminuição da quantidade de peixes e camarões, outrora abundantes, incentiva o uso de técnicas predatórias, no afã de se obter um maior rendimento da pescaria. Pequena parcela dos pescadores artesanais profissionais apelaram para o uso de bombas e outras técnicas predatórias.
-

Mudanças no ciclo reprodutivo da ictiofauna

- Interrupção da piracema, no trecho Xingó-Paulo Afonso, pela construção da barragem de Xingó.
 - Ausência de escada de peixe na barragem de Xingó, causando interrupção da piracema.
 - Ausência das fortes correntezas das enchentes prejudicam o ciclo biológico da maioria das espécies.
 - Águas límpidas em boa parte do ano prejudicam a desova e a proteção que antes conferiam aos alevinos contra os predadores.
-

Mudanças na biodiversidade

Mudanças na diversidade de espécies e estrutura das comunidades ecológicas existentes na calha do rio, estuário e zona costeira

- Favorecimento de proliferação de algumas espécies.
Exemplo: a maior penetração de raios solares nas águas, devido à escassez de sedimentos em suspensão, favoreceu a proliferação de plantas macrófitas, particularmente a espécie denominada pelos ribeirinhos de “cabelo” (espécie *Elodea* SP).
 - Destruição de habitats nativos
 - Alteração na biodiversidade das várzeas anteriormente inundáveis com águas do rio São Francisco.
-

Mudanças do teor nutritivo das águas do rio e na região costeira

- Diminuição na quantidade de nutrientes necessários a manutenção da biota

Mudanças no uso das terras ribeirinhas

- Quebra na agricultura tradicional baseada nas periódicas cheias, com a cultura de arroz nas lagoas marginais e várzeas.
- A não ocorrência de cheias impede novas contribuições de nutrientes, fazendo com que a fertilidade do solo caia ano após ano.
- Perdas de áreas agrícolas e obras de engenharia devido à erosão marginal.

Mudanças na navegação

- As mudanças na morfologia da calha e a diminuição da profundidade do rio dificultam sobremaneira a navegação atual, diminuindo o calado das embarcações e a segurança do transporte fluvial.
- A presença de troncos de árvores arrancados pela erosão das margens é mais um risco à navegação.
- A perda da importância do transporte fluvial não está associada à construção das barragens.

Mudanças na foz

- Destruição do Povoado Cabeço pela erosão.
 - Destruição de áreas agrícolas nas margens do rio por erosão.
 - Impactos sobre corredores migratórios na zona costeira.
-

Quadro 2. Síntese dos problemas ambientais mais citados nas publicações sobre o Baixo São Francisco como decorrentes dos barramentos rio acima na área marginal.

2. ÁREA MARGINAL (VARZEAS INUNDÁVEIS)

Extinção das lagoas marginais devido à falta de alimentação de águas durante as cheias.

- Nas enchentes as lagoas eram abastecidas de águas, sedimentos e nutrientes, fertilizando o solo e repondo os alimentos para a ictiofauna.
- Várzeas que não receberam projetos de irrigação foram abandonadas, em termos de seu uso tradicional, pela total falta de alimentação por fluxos de cheias.
- Os solos enriquecidos das várzeas e lagoas eram utilizados tradicionalmente para o plantio do arroz.

Inviabilização da agricultura tradicional nas lagoas e várzeas

- As populações ribeirinhas, antes da construção das barragens, se utilizavam da agricultura de vazante, no período de seca, feita sobre o húmus deixado pelo rio após as cheias. Atualmente, essas populações dependem, para sua subsistência, da chuva ou da irrigação, sendo que a grande maioria não tem acesso a esta última.
- A pesca nas lagoas, cujas águas eram represadas pelos ribeirinhos por ocasião das vazantes, representava uma fonte adicional de renda, embora provavelmente prejudicava o ciclo natural da ictiofauna fluvial.

2. ÁREA MARGINAL (VARZEAS INUNDÁVEIS)

Mudanças no ciclo reprodutivo da ictiofauna

- Interrupção da utilização das lagoas marginais, como parte do ciclo reprodutivo, da sua condição de “berçários” reprodutores das espécies nativas.
 - As águas calmas e ricas em nutrientes favoreciam o abrigo e alimento para inúmeras espécies no período da reprodução. Tradicionalmente, a pesca era fácil e abundante durante todo o ano e, particularmente no período de vazante, após as cheias.
-

Fontes consultadas: Vargas (1999); Cinform (2001), Ministério da Integração Nacional (2002), Projeto São Francisco (1998), Fontes (2001), Consórcio Jaakko Poyry-Tahal (2000), Souza (1998), Rieper (2001)

Um exemplo evidente neste sentido é o propalado assoreamento generalizado do leito do rio em toda a extensão do baixo curso do rio São Francisco, divulgado não a partir de resultados de estudos, mas interpretado a partir da observação da presença de muitos bancos arenosos (“croas”) emersos ou rasos no rio.

Entre outras afirmativas, divulgadas sem a devida comprovação, estão à invasão da cunha salina estuário adentro e que a erosão fluvial e o assoreamento são conseqüências diretas da derrubada da mata ciliar. Apenas em raríssimos casos, principalmente em trabalhos acadêmicos, as observações e interpretações estão embasadas em estudos detalhados ou são comprovadas através de dados quantitativos.

Embora as constatações relacionadas acima possam ser encontradas em diversos relatórios técnicos e publicações, que são unânimes em considerá-las como conseqüência da construção e operação das grandes barragens à montante, constatou-se que existia ainda uma grande carência de estudos que comprovem e quantifiquem esta relação de causa-efeito.

1.2. As manifestações da erosão marginal à jusante da barragem de Xingó

Entre os problemas ambientais atuais do baixo curso do rio São Francisco, a erosão marginal se destaca pela sua visibilidade, amplitude, distribuição e conseqüências socioeconômicas. O problema da erosão nas margens do baixo São Francisco tem gerado uma crescente diminuição das áreas de produção nos perímetros irrigados implantados naquela área, acarretando prejuízos para a economia dos dois Estados envolvidos (Sergipe e Alagoas).

Enquanto outras mudanças ambientais vêm se processando de forma sutil, a erosão das margens é uma das manifestações mais visíveis das alterações na dinâmica do sistema fluvial. É, na visão da população ribeirinha, uma das formas encontradas pelo rio para demonstrar a gravidade das mudanças. Pela sua visibilidade e agressividade, este fenômeno geomorfológico tem tido grande repercussão na imprensa regional (Figura 4).

A erosão das margens no baixo curso do rio São Francisco assumiu proporções mais drásticas em dois trechos da margem direita, onde, coincidentemente, encontram-se os perímetros irrigados de Cotinguiba-Pindoba e do Betume, ambos implantados pela CODEVASF no final da década de 1970. Nestes trechos, o recuo das margens destruiu casas, obras de engenharia



Figura 4. Manifestações na imprensa, sobre os problemas causadas pela erosão marginal, publicadas nos jornais de Aracaju, Cinform, Correio de Sergipe, em 2001 e 2002.



Figura 5. Fotomontagem evidenciando a evolução do processo erosivo e recuo da linha de costa no Povoado Cabeço na foz do rio São Francisco.

do Perímetro Irrigado, estradas e levou à perda de áreas agrícolas, além de gerar significativos custos financeiros adicionais a CODEVASF que por diversas vezes foi obrigada a reconstruir os diques de proteção contra cheias que margeiam os perímetros irrigados e a executar obras para protegê-los da erosão.

A manifestação mais dramática do processo erosivo ocorreu na região da foz, onde o recuo da linha de costa levou à destruição do povoado Cabeço (Sergipe), situado na margem sul (Figura 5). As perdas materiais contabilizaram mais de 40 casas, escola, igreja, cemitério, além de uma grande área de praia.

Apenas o farol, construído no século XIX, resistiu à ação das ondas e marés e permanece, ainda hoje, semi-intacto, já dentro do oceano (Figura 5), como testemunho dos eventos erosivos e da antiga posição da linha de costa. Sob o ponto de vista social, os efeitos da erosão trouxeram muitos transtornos à população do povoado que, após intervenção do poder público municipal, foi remobilizada para uma nova vila, perdendo parte de seus referenciais históricos.

O caso do povoado Cabeço é emblemático do estado de degradação ambiental vivenciado pelo rio, pois a “foz do rio funciona como um indicador de mudanças introduzidas na bacia hidrográfica, sendo extremamente sensível a impactos gerados pelas grandes obras à montante que modificaram o regime de fluxo do curso d’água e, conseqüentemente, o equilíbrio entre os processos marinhos costeiros e os fluviais” (CPERH, 1997).

1.3. Erosão natural ou induzida?

A presença de depósitos sedimentares fluviais pretéritos na planície e margens do rio São Francisco atesta que mudanças laterais na posição do canal fazem parte da evolução da sua dinâmica ambiental. E mudanças na posição do canal são necessariamente acompanhadas pela erosão de suas margens, única forma da calha fluvial se movimentar lateralmente.

Portanto, se a erosão marginal faz parte da história geológica do curso inferior do rio São Francisco, por que então destacá-la agora como um evento recente e de implicações ambientais negativas? E por que associar as atuais manifestações do processo erosivo ao longo das margens do rio, às intervenções antrópicas ao longo da bacia hidrográfica?

É necessário ressaltar que tanto a dinâmica natural quanto à induzida pelas intervenções antrópicas pode resultar em um mesmo produto: margens em erosão. Este fato dificulta o processo de análise das causas e impõe o estabelecimento de uma metodologia adequada à solução do problema.

Buscou-se então uma abordagem histórica da questão com o intuito discernir entre a influência de uma ou da outra., a partir da análise das mudanças no regime hidrológico e sedimentológico deste trecho do rio, além da observação da evolução do canal nas bases cartográficas, aerofotográficas e de imagens de satélites existentes. Foram também coletadas informações através de uma série de observações de campo, assim como a pesquisa dos documentos que tratam do problema da erosão neste trecho do rio e entrevistas informais com moradores ribeirinhos (irrigantes, barqueiros e pescadores) e técnicos da CODEVASF que atuam ou atuaram na região.

Um das questões mais desafiantes, para quem observa atualmente o rio, é encontrar a resposta ao fato da erosão marginal acelerada no Baixo São Francisco ocorrer em grande parte nas condições normais do dia-a-dia, sem cheias ou outros eventos episódicos ou atmosféricos que a justifiquem. Marca-se um ponto em um determinado trecho de margem submetido à erosão, e quando se retorna ao local, dias depois, percebe-se o recuo da margem. Esta é uma peculiaridade que intriga os que conhecem o fenômeno.

Para se obter uma resposta satisfatória a suspeita levantada por vários pesquisadores, ambientalistas e representantes da população ribeirinha, de que o aceleração e a disseminação da erosão marginal no baixo curso do rio São Francisco são uma consequência indireta dos barramentos construídos rio acima, serão discutidas neste relatório os fatores intervenientes, os processos envolvidos e suas possíveis causas diretas e indiretas.

2. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DO BAIXO SÃO FRANCISCO

O Baixo São Francisco ocupa uma área de 30.377 km², equivalente a 5% da área total da Bacia do São Francisco, correspondendo à menor porção dentre as quatro subdivisões fisiográficas da Bacia.

O baixo curso do rio São Francisco está situado no trecho entre a cidade de Paulo Afonso, Estado da Bahia (BA) e a sua foz, perfazendo um total de 265 km no sentido oeste-leste. Para efeito do presente relatório, aborda-se o baixo curso exclusivamente no trecho entre Canindé do São Francisco - onde está localizada a barragem de Xingó - e a foz do rio São Francisco, no Oceano Atlântico.

O rio São Francisco é utilizado na região para diferentes finalidades sociais e econômicas como abastecimento de água para populações urbanas (inclusive a cidade de Aracaju e varias outras cidades do Estado de Sergipe e Alagoas, situadas dentro ou fora da Bacia), diluição de efluentes domésticos, abastecimento de agricultura irrigada, com plantio de culturas de ciclo curto, pesca, aqüicultura, ecoturismo, navegação e exploração da hidroeletricidade através da Usina de Xingó, da Companhia Hidrelétrica do São Francisco - CHESF.

O vale do baixo curso do São Francisco, pela sua configuração perpendicular em relação ao litoral, atravessa os vários domínios morfoclimáticos da região, que apresentam uma perceptível zonação no sentido W/E, do mais árido ao litorâneo úmido (Vargas, 1999).

Atravessa, da mesma forma, três grandes unidades geológicas morfoestruturais (Figura 6): terrenos pré-cambrianos cristalinos/metasedimentares, terrenos sedimentares mesozóicos e terrenos sedimentares quaternários (Monteiro, 1962, in Vargas, 1999).

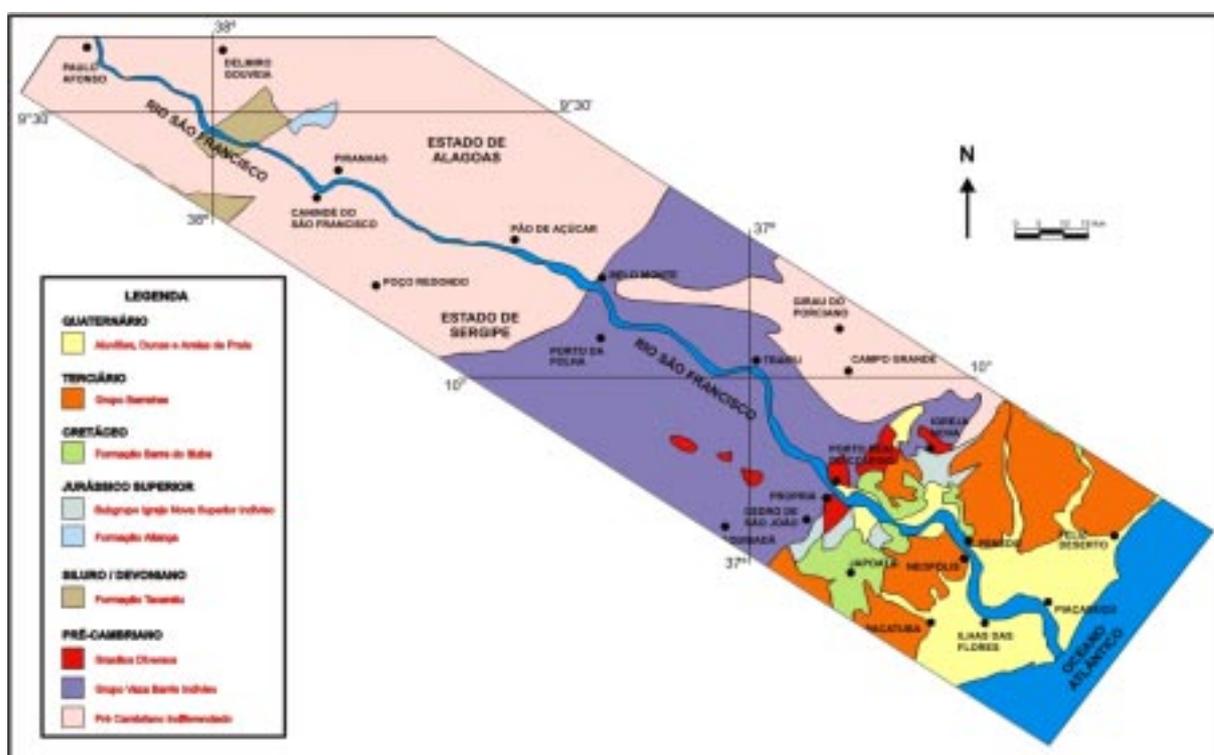


Figura 6. Mapa geológico simplificado da região do Baixo São Francisco. Modificado de: Carta geológica Brasil ao Milionésimo, DNPM (1976).

Estas unidades correspondem, respectivamente, às seguintes unidades geomorfológicas: Pediplano Sertanejo, Tabuleiros Costeiros e Planície Costeira (Figura 7).

Entre Paulo Afonso (BA) e Propriá (SE) o leito do rio assenta-se sobre rochas ígneas e metamórficas pré-cambrianas, sendo que, entre Paulo Afonso (BA) e Pão de Açúcar (AL), o rio São Francisco corre encaixado em um “canyon” e o relevo circundante é um pediplano, o Pediplano Sertanejo (Figura 7). Neste, predomina o relevo suave-ondulado de colinas baixas predominantemente sobre granitóides, com alguns “inselbergs” destacando-se na paisagem.

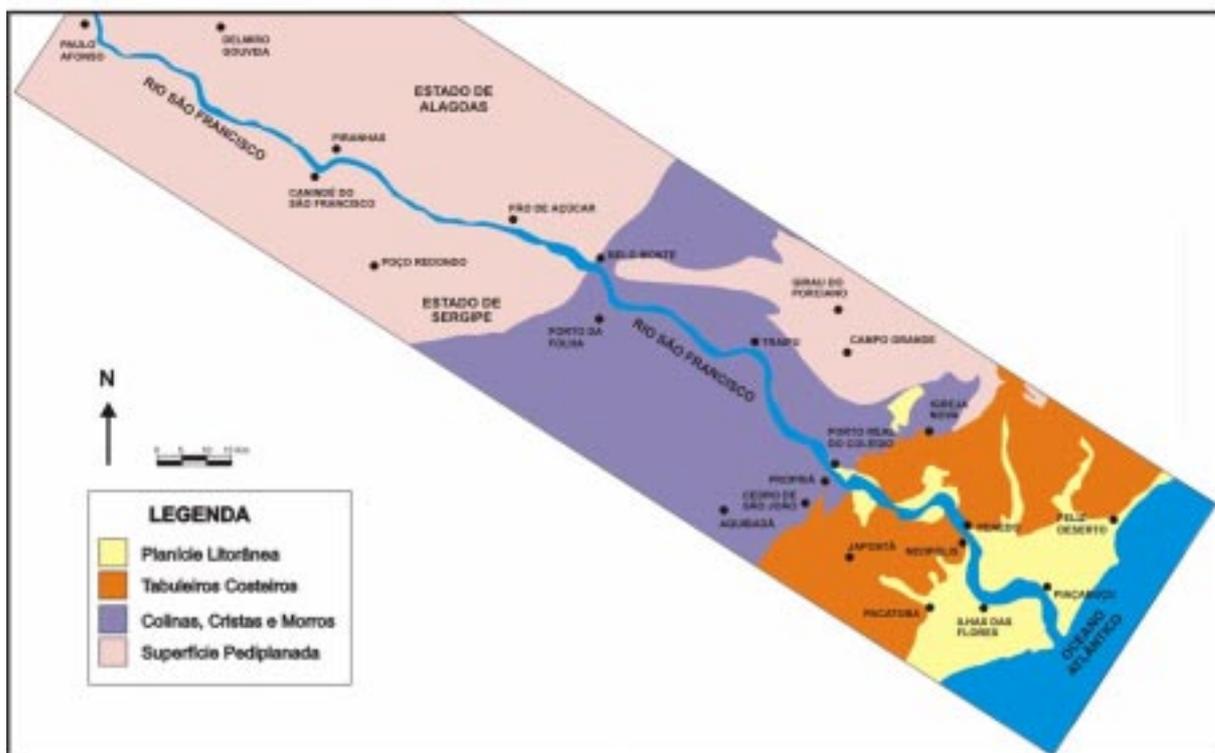


Figura 7. Unidades geomorfológicas Baixo São Francisco. Modificado de DNPM, 1976.

À jusante de Pão de Açúcar (AL), o canyon termina e o vale se alarga à medida que o rio se aproxima do litoral, mas o relevo circundante engloba uma variedade maior de relevos que vão desde o relevo plano até o fortemente ondulado, ditados principalmente pelos diferentes graus de entalhe nos xistos e gnaisses que aí predominam (SUVALE, 1973).

Esta subunidade, também considerada como parte do Pediplano Sertanejo, é caracterizada por apresentar alinhamento de cristas e vales subseqüentes e perpendiculares, resultantes da dissecação diferencial e do desgaste de estruturas dobradas e ocasionais exposições do seu embasamento de xistos, quartzitos e gnaisses. A planície fluvial é estreita, alargando-se apenas nas confluências com os afluentes.

O município de Propriá posiciona-se no limite entre o árido e o úmido, entre a caatinga e a floresta mesófila, entre os pediplanos e os tabuleiros, entre os solos litólicos e os solos podzólicos, entre a Bacia Sedimentar Sergipe-Alagoas e os terrenos pré-cambrianos da Faixa de Dobramentos Sergipana.

De Propriá (SE) até Neópolis (SE)/Penedo (AL), o rio corta a unidade morfoestrutural terrenos sedimentares mesozóicas e desenvolve uma planície fluvial mais ampla. O relevo circundante ao vale é predominantemente constituído pelos tabuleiros costeiros desenvolvidos sobre os sedimentos terciários do Grupo Barreiras.

De Neópolis em diante o rio corta terrenos quaternários pleistocênicos e holocênicos nos quais se desenvolveu uma feição do tipo deltaica, formada por depósitos aluviais e litorâneos que constituem a planície litorânea (Figura 7). A planície litorânea ocorre ao longo do litoral de Sergipe e Alagoas e constitui uma paisagem monótona, de superfície aproximadamente plana, com ondulações fornecidas por dunas eólicas ativas e inativas.

A calha do rio está contida na unidade geomorfológica Planície do rio São Francisco, que corresponde ao fundo do vale do Rio. Trata-se de uma superfície de acumulação gerada por processos fluviais (CODEVASF, 2000).

Os trechos das inundações permanentes são conhecidos como várzeas e os demais constituem os terraços fluviais. Foram identificadas 145 várzeas (CODEVASF, 1973), ocupando uma área inundável de 78.000 ha, sendo que 130 ocupam pequenas áreas. Duas das várzeas, Marituba (AL) e Betume (SE), cobrem mais da metade desta área (Figura 8). Outras várzeas de maior área são as de Boacica, Cotinguiba, Itiúba e Propriá.

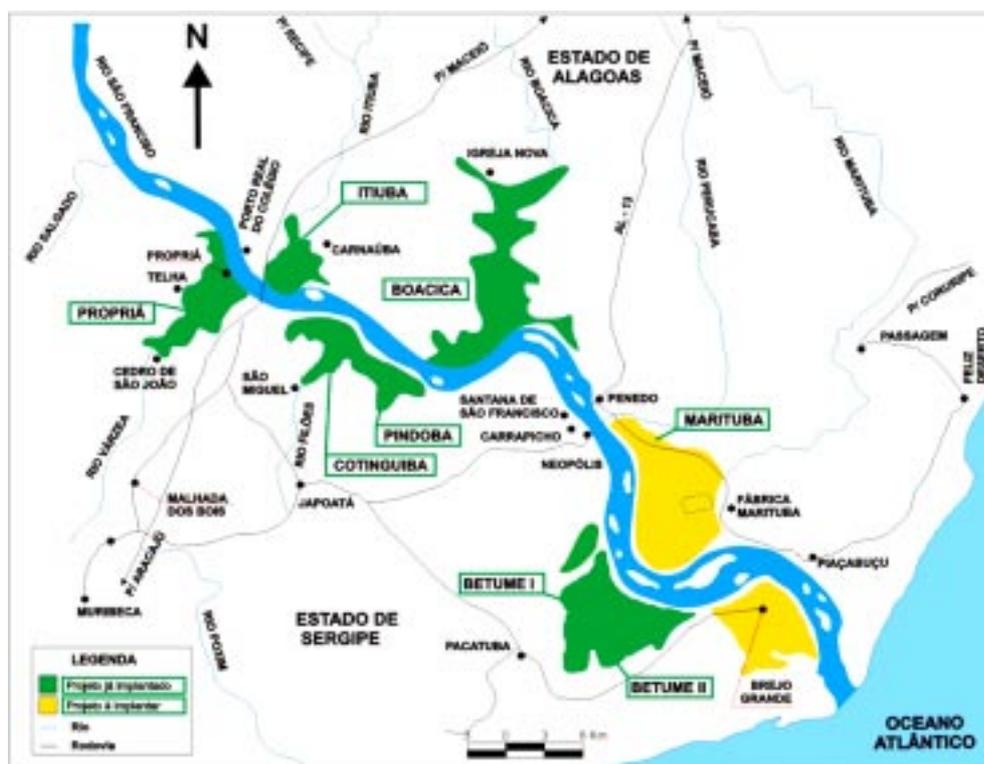


Figura 8. Várzeas e Perímetros Irrigados da CODEVASF no Baixo São Francisco. Fonte: CODEVASF (1973).

Em termos de declividade, o baixo curso do rio São Francisco apresenta um pequeno trecho inicial, entre Paulo Afonso (BA) e Piranhas (AL), de cerca de 65 km, onde ocorre um desnível da ordem de 115 metros. Em seu trecho final, de Piranhas até a foz, o rio percorre cerca de 200 km com uma declividade média de 0,5 m/km.

Quanto ao clima, o baixo curso do rio São Francisco percorre inicialmente uma faixa semi-árida que gradualmente passa a subúmida úmida a partir de Propriá até a foz. Na porção da bacia estudada, entre Propriá e a foz, a temperatura média anual compensada é de 25° C. O mês mais quente é o dezembro que gira em torno de 26 a 27°C e o mês mais frio é junho, com temperaturas em torno de 23°C.

A precipitação pluvial anual está entre 800 e 1.200 mm. A distribuição média mensal da precipitação apresenta período mais chuvoso, que vai de março a agosto, e um menos chuvoso, que se estende de outubro a fevereiro (SEPLANTEC, 1997).

3. ANÁLISE DA EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA MORFOLOGIA DO CANAL E DA EROSIÃO MARGINAL NO TRECHO DO PERÍMETRO IRRIGADO COTINGUIBA-PINDOBA

No trecho entre Propriá e a foz, não foram encontradas evidências de significativas mudanças na posição das curvas principais do rio São Francisco, nos últimos 148 anos. Ao contrário do que é comum acontecer em grandes rios que cruzam planícies sedimentares no seu curso inferior, não foram observadas grandes e evidentes mudanças laterais na posição da calha fluvial e nem, tampouco, migrações de suas curvas no período histórico mencionado (Figura 9).

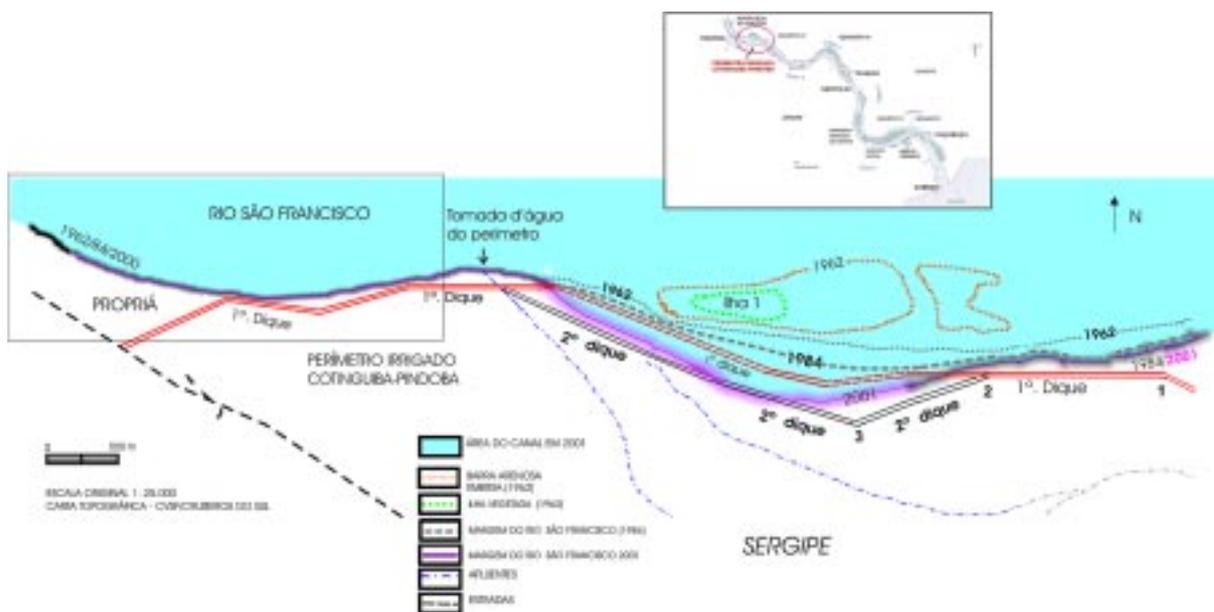


Figura 9. Mapa apresentando sucessivas linhas de margens (1962, 1984 e 2001) do rio São Francisco, reconstituídas a partir de mapas topográficos e fotos aéreas.

Apesar disso, ocorreram mudanças internas na morfologia da calha, sem entretanto implicar em mudanças significativas na geometria externa da calha do rio.

Na análise histórica das mudanças morfológicas, em planta, do canal fluvial ficou evidente que o segmento do rio entre Propriá e Penedo é caracterizado por constantes mudanças na sua morfodinâmica interna e na trajetória do talvegue/canal principal (Figura 10).

O acompanhamento histórico demonstrou que no trecho do rio onde se situa o Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, na margem direita, ocorreu uma inversão do processo geológico dominante no início da década de 70. Até a década de 60 predominava a sedimentação, mas já no início da década de 70 o local passou a ser palco da atuação de processos erosivos, porém de forma não contínua, uma vez foi intercalado por períodos de assoreamento após as cheias.

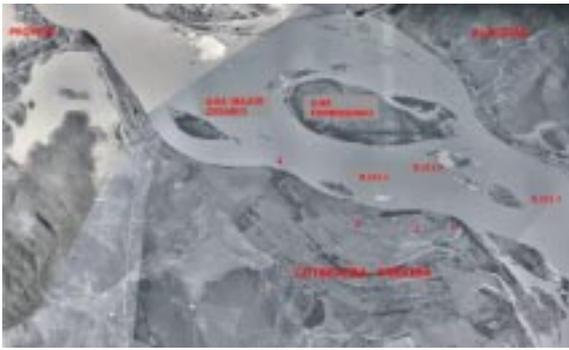


Foto aérea da região de Cotinguiba-Pindoba obtida em 1950, período de enchente.



Mapa topográfico (1962) da região da várzea do Cotinguiba (CODEVASF)



Montagem de fotos aéreas de 1973, linhas de fluxo principais (azul). Notar a formação de novas barras arenosas no canal e a erosão da ilha 1 situada em frente à margem do Cotinguiba, acompanhando mudança na trajetória do talvegue.



Foto aérea de dezembro 1984. Setas azuis indicam interpretação de linhas de fluxo à esquerda, ponte Propriá-Colégio.



Foto aérea de janeiro 1988, em período de enchentes. Notar a proximidade do dique em relação à margem.



Montagem de fotos aéreas obtidas em 2000.

Figura 10. Comparação de fotos aéreas e mapas da região de Cotinguiba-Pindoba em diferentes épocas.

Concomitantemente, ocorreu a mudança na trajetória do talvegue principal, da margem esquerda para a direita. A partir da grande cheia de 1979, o canal principal/talvegue passou a se dirigir para o centro da calha e daí para margem direita (sergipana), onde permaneceu desde então, com uma forte tendência a acentuar sua curvatura em direção ao trecho onde se situa o Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.

Assim, o início do fenômeno erosivo no trecho correspondente ao Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba é anterior à implantação do Perímetro Irrigado e da construção da barragem de Sobradinho.

Entretanto, ficou evidenciado que o processo erosivo na margem direita tornou-se acentuado a partir do início da década de 80, período imediatamente posterior à entrada em operação da usina hidrelétrica de Sobradinho, tornando-se mais agressivo no final da década de 90, o que pode ser atribuído, em parte, à incapacidade do canal modificar e renovar periodicamente sua morfodinâmica devido ausência das cheias anuais, e à necessidade do canal se adequar às novas condições hidrosedimentológicas impostas pela construção e operação das grandes barragens rio acima.

Considerando a largura da faixa erodida no período de 1980-2001 calcula-se que o rio avançou cerca de 750 metros no ponto mais crítico, sendo 350 metros correspondentes a uma ilha anteriormente existente no local e 400 metros ao recuo da margem do rio propriamente dita, o que resulta em uma taxa média de em torno de 22,0 m/ano (Figura 11).

Aparentemente este recuo não ocorreu de maneira uniforme. Além de ter provocado a destruição de parte do 1º e do 2º diques de proteção contra cheias do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, atualmente cerca de 2.000 metros ao longo da margem continuam sofrendo intensa erosão fluvial.

As soluções de engenharia civil empregadas pela CODEVASF para conter o avanço da erosão - adotadas sempre em caráter emergencial e com alto custo - falharam parcialmente, provavelmente devido à falta de estudos prévios que objetivassem a compreensão do comportamento da dinâmica fluvial e ao conhecimento dos fatores e processos envolvidos, agravados pela ausência de dados precisos de monitoramento hidrosedimentológico e geomorfológico.

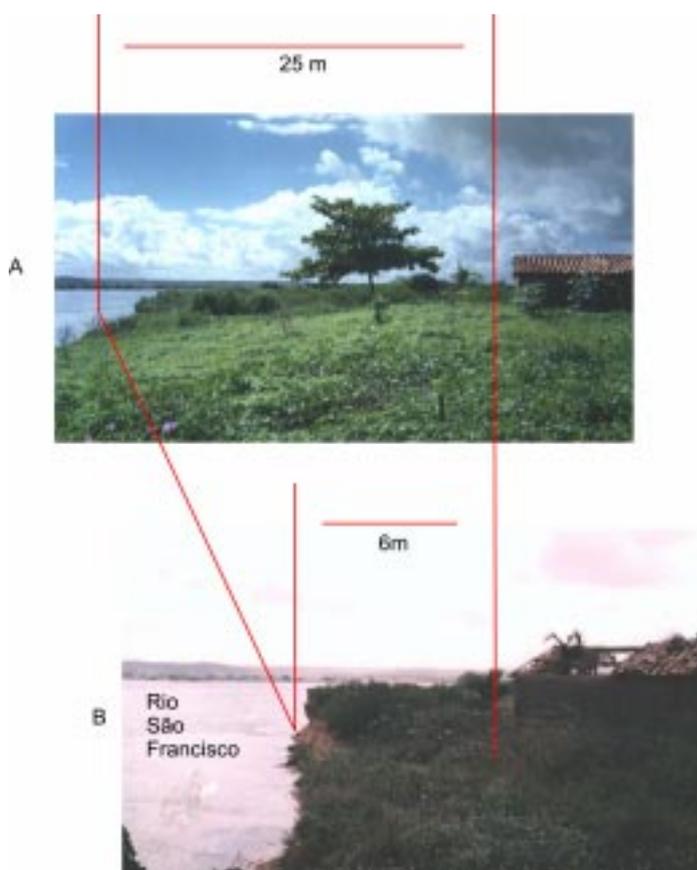


Figura 11. Recuo da linha de margem, destruindo a faixa de terreno anteriormente existente entre a estrada e a margem do rio. Foto a) obtida em 24/5/99 e b) em 8/11/99. Fotos: Casado (2000).

4. QUANTIFICAÇÃO DA EROÇÃO MARGINAL DO PERÍMETRO IRRIGADO COTINGUIBA PINDOBA

O monitoramento do trecho da margem correspondente ao Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, no período de fevereiro 1999 a outubro 2001 (33 meses) resultou em taxas de erosão marginal acumulada (recoo da margem) diferentes de acordo com a seção monitorada: na Seção A foi de 15,37 m, na Seção B, 66,46 m e na seção C de 17,15 m. (Figura 12)

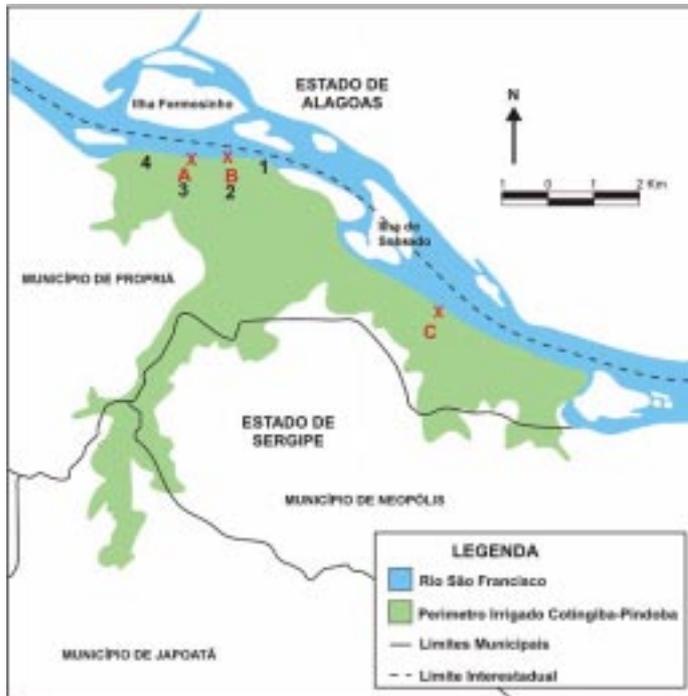


Figura 12. Localização das seções de monitoramento do processo erosivo. Taxas de erosão obtivas: Seção A (8,30 m/ano), Seção B (47,30 m/ano). Fonte: CASADO (2002)

A seção B, onde ocorreu a maior taxa de erosão (média mensal de 2,0 metros e média anual de 24 metros), é caracterizada por também apresentar as maiores porcentagens de material arenoso (95,31 %) e menores porcentagens de argila e silte (0,97 %) na composição das camadas da base do barranco, o que lhe confere menor coesão e, sob este aspecto, maior susceptibilidade à erosão.

As diferenças na distribuição das taxas de erosão marginal, que variam de um ponto para outro da margem, são atribuídas, em parte, às mudanças nas características litológicas do barranco e da sua altura, e em parte às inter-relações com a dinâmica do canal.

Os dados sugerem que as maiores taxas de recuo da margem estão relacionadas

com maiores porcentagens de material arenoso e menores porcentagens de silte e argila na composição granulométrica das camadas que compõem o barranco. A altura do barranco também é um fator importante – as maiores alturas correspondem as maiores taxas de erosão.

A erosão marginal também tem uma importante distribuição temporal. Ela não é contínua e está vinculada às magnitudes dos eventos climáticos, principalmente a intensidade das marés e dos eventos hidrológicos, como as pequenas variações na vazão regulada e as conseqüentes variações do nível do rio e da velocidade do fluxo. Isso, associado às características do barranco em cada ponto, fez com que as taxas erosivas fossem maior em determinados meses do ano.

A magnitude do processo erosivo é significativa neste trecho da margem, com elevadas taxas de erosão anual, provocando impactos negativos econômicos, sociais e ecológicos à região, destruição de obras civis construídas às margens do rio São Francisco e perda de grande volume de solo agrícola.

Ao longo do período de monitoramento, foram vivenciados problemas metodológicos com o emprego do método dos pinos, decorrentes da extraordinária magnitude do processo erosivo. O rápido recuo das linhas das margens, em alguns meses, inviabilizou a utilização dos pinos na medição desse recuo. Foi constatado que os pinos só desempenham papel eficaz na medição quando as taxas de erosão marginal são inferiores a 0,8 m/mês.

O volume de material erodido total, de fevereiro 99 a outubro 01, considerando apenas as áreas de influência das 3 Seções monitoradas, foi de 10.107 m³, correspondendo uma perda de 38.664 m² de área agricultável no Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba (Quadro 3).

Quadro 10. Volume de material erodido nas três seções estudadas no período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2000.

Seção	Altura média do barranco (m)	Extensão lateral da seção monitorada (m)	Recuo da margem (m)	Volume de material erodido (m ³)
A	5,21	12,0	7,30	456,40
B	6,36	12,0	33,30	2.541,46
C	3,91	12,0	2,45	114,95

A conseqüente diminuição da lâmina de água dificulta a navegação e diminui o calado possível para as embarcações, o que prejudica a locomoção e acesso a serviços pela população das cidades ribeirinhas, além ameaçar a segurança do transporte fluvial. Nas partes que se tornam rasas observa-se uma maior facilidade para proliferação desequilibrada de algas (macrófitas), devido a uma maior possibilidade da luz solar atingir o fundo do rio.

As macrófitas, denominadas de “cabelo” ou “mato” pelos pescadores, inibem o uso de instrumentos como a rede e a tarrafa, o que está comprometendo o sustento de uma grande parcela da população que mora nas regiões ribeirinhas e sobrevivem da pesca.

5. COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS TALUDES MARGINAIS NAS MARGENS DO PERÍMETRO IRRIGADO COTINGUIBA PINDOBA

Resultados relevantes quanto ao comportamento geotécnico dos taludes marginais e do lençol freático no trecho do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba

Variações de vazão e do nível do rio interferem sobremaneira no aquífero local provocando sua elevação ou rebaixamento. Estas variações da cota do rio na área de estudo estão condicionadas às subidas e descidas diárias provocadas pelas marés no estuário e às flutuações nas vazões liberadas pela Usina Hidrelétrica de Xingó.

No período monitorado (janeiro de 2002 a fevereiro de 2002) o fluxo hidráulico normal da água subterrânea local deu-se no sentido da margem para o rio. O nível do lençol freático se eleva na razão de 0,1744m/m, na medida em que se afasta da margem.

Entretanto, quando da elevação do nível do rio (o que ocorre diariamente em função da maré e da operação da Usina Hidrelétrica de Xingó) o fluxo se inverte passando a ser do rio para a margem. Neste caso, a relação entre a elevação do nível do rio e o nível de água subterrânea, obedece à proporção de 1:0,6861, ou seja, cada elevação de 1m na cota do rio corresponde a uma elevação de 0,6861m no nível do lençol freático.

Apenas na Seção C, apesar da tentativa de se estabelecer uma correlação entre o nível do rio e o nível de água no subsolo não se observou nenhuma relação entre essas variáveis, uma vez que as cotas do nível de água no subsolo permaneceram inalteradas durante o período estudado. Isto se

deve ao fato do material da base do talude na seção C, predominantemente silte-argiloso, ser menos permeável que as demais seções, o que explica também por que o processo erosivo é bem menos agressivo na seção C, quando comparada com as demais.

A direção normal do fluxo hidráulico, da margem para o rio, chama a atenção para a contribuição que o mesmo pode estar fornecendo para o processo de solapamento da base do talude. A água que percola o interior de um talude em direção ao rio, exerce, em virtude de sua viscosidade, uma pressão sobre as partículas do subsolo. Esta pressão atua no sentido do fluxo e tende a provocar uma movimentação ou lixiviação das partículas mais finas para o sopé do talude. Como consequência desse processo, a camada arenosa da base do talude vem sendo submetida a uma situação de desequilíbrio. Além disso, os fluxos de água subterrânea torna a base do talude saturada, deixando-a mais susceptível ao solapamento pela ação de ondas (Figura 13).

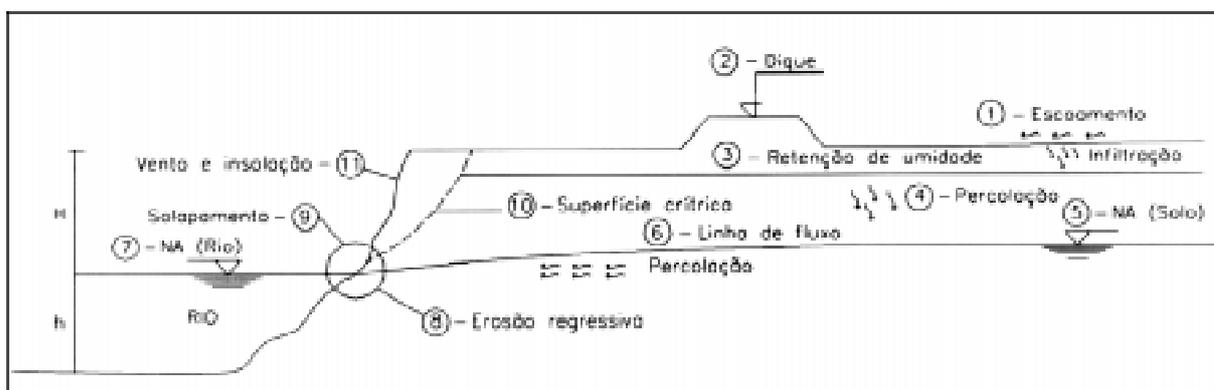


Figura 13. Representação esquemática dos principais mecanismos de desestabilização dos taludes marginais estudados no Baixo curso do Rio São Francisco.

Na análise de estabilidade dos taludes, as seções apresentaram fatores de segurança (FS) diferenciados. Nas condições naturais, sem intervenção antrópica (retaludamento), nenhuma das seções mostrou-se estável. Apenas a seção C apresentou um Fator de Segurança (FS)=0,975 próximo ao equilíbrio-limite FS=1. Deve-se considerar que a instabilidade dos taludes está diretamente relacionada com as características granulométricas das camadas que compõem o barranco. Em terrenos arenosos inconsolidados, o grau de instabilidade será maior do que em solos mais coesos.

A ausência de vegetação na superfície do talude e o lençol freático mais baixo do que nas condições naturais, também faz surgir outro fator predisponente da erosão. A insolação incidindo diretamente sobre as partículas do material arenoso constituinte da superfície do talude faz com que o mesmo perca a sua umidade natural. O ressecamento trás como consequência à perda da coesão aparente provocando a separação das partículas e facilitando a sua remoção pela ação da força da gravidade.

A ausência de cheias, nos últimos 10 anos, imposta pelo controle da vazão do rio pelas grandes barragens, também implicou no rebaixamento do lençol freático no período do ano correspondente as mesmas (dezembro a maio). Isto significa que em praticamente metade do ano, o nível do lençol freático permanece abaixo do nível natural, o que, entre outras implicações, significa perda de coesão das areias que formam a margem, facilitando a ocorrência de movimentos de massa gravitacionais.

6. CARACTERIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DA EROÇÃO MARGINAL NO BAIXO CURSO DO RIO SÃO FRANCISCO

Foram identificados e cadastrados, em 2001, 72 focos de erosão marginal acelerada na faixa compreendida entre Pão de Açúcar (AL) e a foz do rio São Francisco. No trecho objeto do presente estudo, isto é, entre Propriá e a foz foram cadastrados 57 focos de erosão marginal. (Figura 14). Para montante, entre Propriá (SE) e Pão de Açúcar (AL), foram identificados os demais 15 focos. Apesar dos focos de erosão marginal ocorrerem em ambas às margens, a maior quantidade deles e os de maior magnitude estão localizados na margem, sergipana.

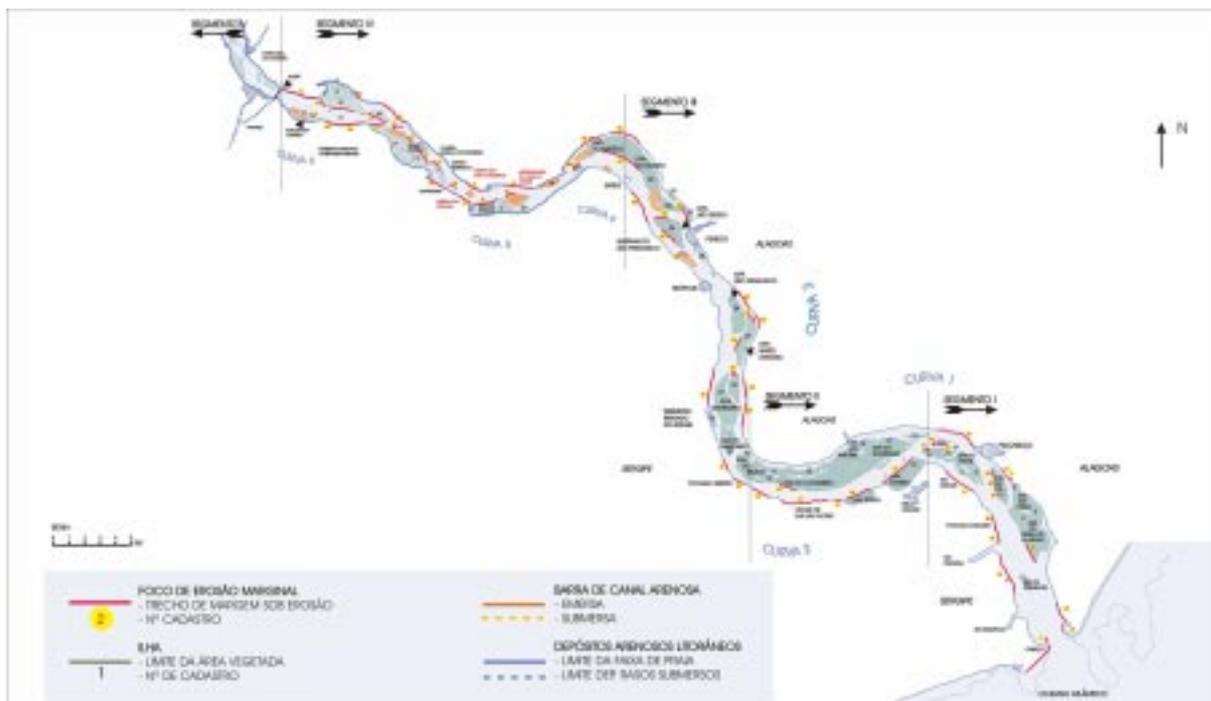


Figura 14. Mapa do baixo curso do rio São Francisco, entre Propriá e a foz, dividido em segmentos e feições geomorfológicas identificadas.

Na margem direita do rio (Sergipe), entre Propriá e a foz, o somatório dos comprimentos dos trechos sob erosão resulta em uma extensão total de 29,90 km. Isto significa que 39,9 % da margem sergipana estão atualmente sofrendo erosão. Na margem alagoana, a erosão marginal atinge uma menor extensão, da ordem de 17,8 km, o que corresponde a 22,5% do comprimento da linha de margem esquerda. Em termos absolutos, a erosão na margem direita excede a da esquerda em 12,1 km, ou seja, uma diferença de 68% entre ambas.

A erosão marginal não fica restrita às margens da calha principal do rio. As margens das ilhas e das “croas” (barras arenosas emersas) situadas no meio do rio, também apresentam trechos submetidos à erosão ativa, perfazendo um total de 10,5 quilômetros.

6.1 Tipos de margens fluviais e padrões das margens submetidas à erosão

Em linhas gerais o trecho do rio São Francisco entre Propriá e a sua foz, apresenta três classes de margens: margens em erosão, margens em acreção e margens estáveis. Margens em erosão foram definidas como aquelas que apresentam evidências de estarem sendo submetidas atualmente

à atuação significativa de processos erosivos acelerados, apresentam recuos constantes e formam barrancos com faces quase verticais (também referidos como taludes marginais ou “barrancas”).

As margens sob erosão foram classificadas em 6 tipos distintos (A, B, C, D, E e F) com base nas suas características físicas e nas suas posições relativas à geometria do talvegue e do canal, apresentando respostas distintas em relação à atuação dos processos erosivos.

As margens Tipo A (Tipo Pontal da Barra) são formadas por areias de dunas eólicas atuais e ocorrem apenas na margem esquerda da foz.

As do tipo B (Tipo Saramen) são margens arenosas, de perfil suave, onde se desenvolve uma faixa de praia fluvial, limitada por um pequeno barranco, de natureza erosiva, com distribuição restrita aos segmentos mais inferiores do rio, entre a foz e as proximidades da cidade de Ilha das Flores.

Margens do Tipo C (Tipo Fazenda Mucuri), tem uma distribuição espacial semelhante e também são margens baixas, porém essencialmente constituídas por argilas ricas em restos de vegetais.

As margens tipo D (Tipo Dique), corresponde a aqueles trechos do rio onde o recuo da margem atingiu os diques de proteção contra cheias dos Perímetros Irrigados da CODEVASF ou onde foram colocados blocos de rocha (enrocamento) para proteção da margem em relação à erosão marginal.

As margens tipo E (Tipo Betume) são caracterizadas pela constituição mista (argilas, siltes e areias interestratificadas), de altura média a alta, com ausência de faixa de praia, sendo dominantes no trecho compreendido entre Ilha das Flores e Penedo, posicionadas adjacentemente ao talvegue.

As margens do tipo F (Tipo Cotinguiba-Pindoba) são essencialmente formadas por areias não coesivas, altas a médias, e se caracterizam por se posicionarem geralmente nas curvas desenvolvidas pelo talvegue/canal principal, nos pontos onde o mesmo inflete em direção à margem. As margens do Tipo Cotinguiba-Pindoba estão distribuídas entre Propriá e Neopólis, onde estão concentrados os mais ativos e extensos focos de erosão marginal (Figura 15 e Foto 1).



Figura 15. Perfil estratigráfico vertical da margem tipo não-coesiva, do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.



Foto 1. Base de margem da calha principal constituída por areias de origem fluvial. Notar o solapamento produzido pelas ondas.

7. ANÁLISE DOS FATORES E DAS CAUSAS DA EROSÃO MARGINAL

7.1 Fatores e processos hidráulicos e geomorfológicos relacionados à corrente fluvial

A geometria do canal afeta muita das forças causadoras da erosão marginal. A ação das principais linhas de fluxo do canal fluvial, que acompanham as linhas de talvegue (Figura 16), é muito importantes na distribuição espacial da erosão marginal.

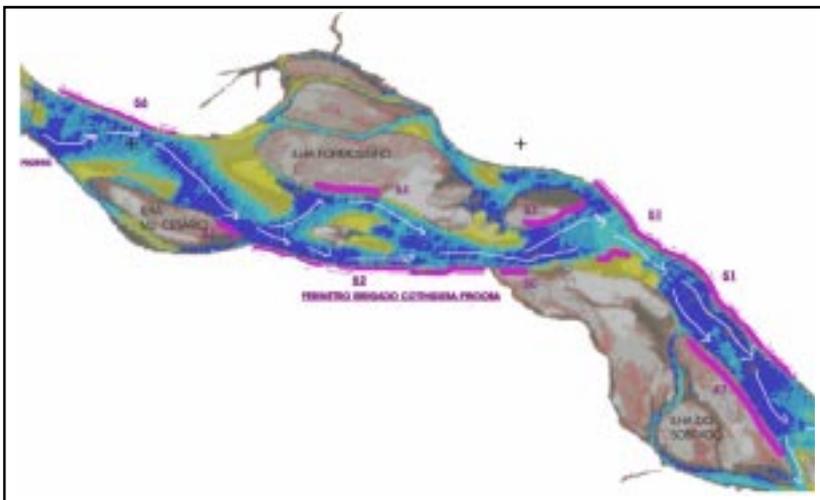


Figura 16. Imagem obtida a partir do geoprocessamento de imagem de satélite SPOT, 1991. Os tons mais fortes de azul indicam águas mais profundas e permitem visualizar o traçado do talvegue. Notar a estreita relação entre talvegue (traço branco) e trechos sob erosão acelerada (traços lilás).

O mapeamento dos focos erosivos e processamento de imagens de satélite evidenciou uma estreita correspondência entre a maior parte deles e os trechos onde o talvegue encontrava-se aderente à margem. A maior parte dos casos encontra-se relacionada ao canal principal, mas há casos em que o canal se bifurca e a erosão ocorre nas duas margens do rio, uma no canal principal e outra em um canal secundário.

Uma conclusão importante a que se chegou é que não existe uma correspondência direta entre focos erosivos e curvas externas da calha do rio, nos mesmos moldes hidrodinâmicos do padrão de canal meandrante. No baixo curso do rio São Francisco a relação entre o desenvolvimento de erosão marginal está intimamente relacionada com a trajetória do talvegue, onde se concentra as maiores velocidades do fluxo aquoso.

Evidentemente que nas curvas do rio, o fluxo principal sofre uma inflexão em direção ao banco externo (côncavo, em relação a um observador situado dentro do rio), o mesmo acontecendo com o talvegue (linha de maior profundidade) do rio, porém com um ângulo mais forte (Figura 17). A corrente exerce uma pressão de cisalhamento sobre o material da margem e as forças trativas exercidas pela corrente acabam por levantar e arrastar as partículas constituintes do material da margem. Um segmento de margem nesta situação tem uma alta probabilidade de sofrer erosão, cuja magnitude vai depender da velocidade de fluxo, da forma de distribuição da velocidade e das características do material da margem.

Constata-se, por outro lado, que em trechos pouco sinuosos a retilíneos do rio também são encontrados focos erosivos. Ficou evidenciado que estes casos também estavam relacionados à presença do talvegue próximo à margem. A expressiva presença de barras de canal e de ilhas vegetadas no rio São Francisco, também promove constantes subdivisões do fluxo do rio, criando canais secundários, que voltam a se reunir corrente abaixo.

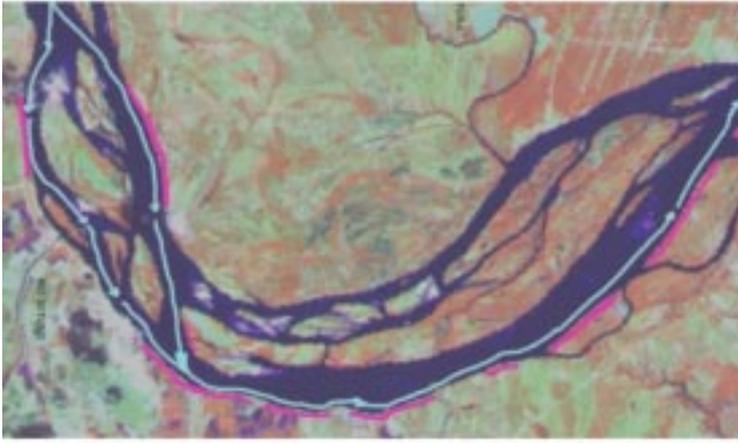


Figura 17. Interpretação do talvegue principal (linha azul clara) incidente sobre a margem externa da curva do rio e as relações com margens sob erosão (linhas lilás). Segmento II, Curva 2. Imagem de satélite Landsat 1990.

Estas constantes bifurcações do canal fazem com que o talvegue ora se dirija para uma margem ora para outra, sem necessariamente estar associado a alguma curva do rio. Geralmente descreve uma forte inflexão em direção à margem, o que potencializa os efeitos erosivos da corrente fluvial que tem sua velocidade drasticamente aumentada no trecho, em relação aos seus valores anteriores. O traçado sinuoso do talvegue, reforça a conclusão deste ser o principal controlador da distribuição dos focos erosivos.

Comprovou-se através de levantamentos batimétricos expeditos que na maioria dos trechos de margens em erosão, o talvegue encontra-se a poucos metros (geralmente a menos de 10 metros) da margem (Figura 18).

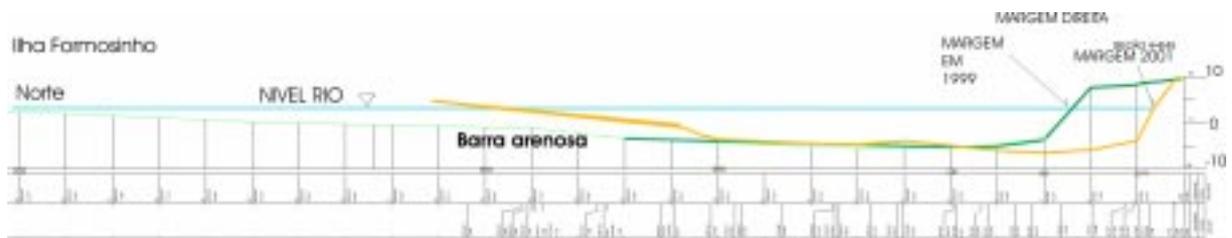


Figura 18. Perfil esquemático transversal ao canal, baseado em levantamento batimétrico efetuado pela CODEVASF em novembro 1999 (linha verde) e em junho 2001 (linha laranja). A Linha azul corresponde ao nível do rio regularizado. Margem do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.

As posições dos canais principais e secundários do rio se modificam ao longo do tempo como parte da dinâmica fluvial e, em conseqüência, o mesmo acontece com a linha de talvegue. Seja em um sistema fluvial natural ou controlado pelo homem, o talvegue muda em função das alterações da descarga, da carga de sedimentos ou como uma conseqüência de erosões e deposições ocorridas em momentos imediatamente anteriores.

Em relação à trajetória da linha de talvegue nota-se claramente que em alguns trechos ocorreram grandes mudanças na sua posição. Assim, trechos de margens anteriormente distantes do talvegue e que, portanto, sofriam pouco ou nenhum processo erosivo, passou a apresentar erosões intensas e aceleradas devido à inversão na posição do talvegue. O caso mais notável é aquele correspondente ao Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.

Outras mudanças mais recentes na trajetória do talvegue, foram encontradas em outros trechos do rio submetidos à erosão fluvial. Estas mudanças podem ser consideradas como uma das causas imediatas para o atual desencadeamento de processos erosivos acelerados nestes locais.

7.2 Características morfológicas das margens e suas relações com a erosão

Margens altas quando comparadas às margens médias e baixas, e estando submetidas às mesmas forças, fatores e processos, apresentam uma maior taxa efetiva de recuo. Isto porque a altura favorece o desencadeamento e a frequência de movimentos de massa controlados pela ação gravitacional e pode facilitar a participação da água subterrânea no processo erosivo, principalmente naquelas constituídas por areias ou interestratificadas (areias e argilas).

As margens mais altas do trecho estudado estão localizadas exatamente nos focos erosivos mais críticos: Cotinguiba-Pindoba (ME-52) e Betume-Povoado Cerrão (ME 20 e 22), ambos entre 5 e 8 metros de altura e constituídas por areias interestratificadas com argilas (Foto 2).



Foto 2. Visão geral da margem do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba (ME-52). Em primeiro plano, restos do dique de proteção contra cheias que localmente constitui a parte superior do barranco, tendo um comportamento mais rígido. Notar a formação da franja ou “saia” formada pelos depósitos de fluxos de grãos.

As margens mais baixas são, na sua maioria, constituídas por camadas de argilas com alturas variando entre 0,5 e 1 metro (em relação ao nível do rio em 2001).

Quanto à distribuição espacial das margens de acordo com a altura, verifica-se que a maior parte das altas e médias ocorre nos segmentos mais distantes da foz (III e IV) e as mais baixas nos segmentos mais próximos à foz (II e I).

As praias fluviais, quando presentes, tendem a ser de pequena largura e a sua formação está relacionada à pelo menos duas gêneses distintas. Nas margens em acresção ou já estabilizadas, ou ainda nas margens das barras arenosas emersas, se formam às expensas das partículas aportadas pela corrente.

Nos trechos onde o talvegue encontra-se aderente à margem, não há desenvolvimento de faixa de praia ou ela é incipiente, com largura máxima inferior a 1,0 metro (Foto 3). A própria inexistência da faixa de praia é um indicativo da proximidade do talvegue e da ação intensa da corrente fluvial. Uma boa parte dos trechos de margens sob erosão não possuem praias, característica que favorece o ataque direto das ondas na base do barranco.

Nos trechos de margens onde as praias são bem desenvolvidas, elas ajudam na estabilização das margens em erosão, ao limitar o alcance das ondas (Fernandez, op. cit) e favorecer a dissipação de sua energia.

As margens sob erosão intensa que possuem faixas de praia pertencem a dois contextos distintos: faixas de praias estreitas associadas às margens altas e praias largas. No primeiro casos estão



Foto 3. Praia fluvial estreita, em trecho sob erosão. A faixa de areias úmida é uma evidência da recente descida do nível do rio, na zona de intermarés.

intimamente associadas à proximidade do talvegue em relação às margens e a ação conjugada da corrente fluvial e ondas do dia-a-dia. No segundo caso são distantes do talvegue e associadas unicamente a ação de ondas nas marés episodicamente mais altas.

Os levantamentos batimétricos realizados nos trechos sem praia ou com praia estreita e onde o talvegue se encontra adjacente às margens, revelaram a existência de uma estreita faixa submersa, aproximadamente plana e rasa, que se estende até as bordas do canal principal. Esta faixa foi designada como plataforma de abrasão.

Esta faixa permanece coberta pela água, mesmo nos períodos correspondentes à maré baixa e representa a área onde o material removido diretamente do barranco ou da praia pelas ondas, é inicialmente acumulado e em seguida retrabalhado e redistribuído pelas correntes fluviais. A plataforma de abrasão contribui para a absorção da maior parte da energia das ondas que incidem em direção às margens.

7.3 Fatores litológicos, geotécnicos e pedológicos, das margens e processos erosivos associados

A litologia e a granulometria do material constituinte das margens exercem um papel importante no seu grau de estabilidade e funcionam como fator facilitador ou inibidor ao avanço da erosão marginal. A resistência da margem à erosão está diretamente relacionada às suas características litológicas. De acordo com o material constituinte, as margens em erosão são agrupadas e classificadas, segundo o seu grau de coesão, o qual exprime a maior ou menor estabilidade do talude marginal e resistência à remoção de partículas pela erosão.

As margens formadas essencialmente por sedimentos coesivos são os mais resistentes a erosão. Entretanto, quando sofrem solapamento e/ou ficam saturados, ocorrem com frequência movimentos de massa, como queda de blocos e deslizamentos. A ação erosiva sobre estas margens, portanto, só é efetiva quando sofrem a ação corrosiva da corrente fluvial (provocando o solapamento) ou o embate direto das ondas nas subidas das marés.

As margens foram individualizadas como margens do Tipo C (Tipo Fazenda Mucuri) e estão distribuídas espacialmente apenas nas proximidades da desembocadura. Pela posição que ocupam no estuário, são altamente submetidas à ação das marés, cuja amplitude é suficiente para atingir o topo das margens devido a suas pequenas alturas.

Margens formadas essencialmente por sedimentos não coesivos são aquelas classificadas como Tipo A (Tipo Pontal da Barra), Tipo B (Tipo Saramen) e Tipo F (Tipo Cotinguiba-Pindoba), sendo constituídas por litologias essencialmente arenosas. São altamente susceptíveis à erosão, a depender da associação com outros fatores e processos erosivos. Elas tanto são encontradas tanto nas linhas de margens da calha principal como de ilhas e barras emersas.

Em termos de distribuição espacial, este tipo de margem ocorre em todo o trecho estudado, mas com maior concentração no segmento IV, entre Cotinguiba-Pindoba e Cajaiba (Focos erosivos ME 46 a 52), onde foram individualizadas com margens do Tipo F (Tipo Cotinguiba-Pindoba), constituídas por areias finas a médias friáveis a muito friáveis, praticamente sem cimento ou matriz siltica-argilosa, o que explica em grande parte a vulnerabilidade e facilidade com que a erosão avança sobre as mesmas, quando associada a outros fatores. A remoção do material constituinte ocorre principalmente na base do barranco, grão a grão, pela ação combinada da corrente fluvial (corrasão) e da ação das ondas (Foto 4).

Este tipo de margem é também altamente susceptível aos movimentos de massas (Foto 5), pela ação de gravidade, devido à baixa coesão das partículas, uma vez rompida a condição inicial de estabilidade. Os dois processos gravitacionais envolvidos nestes episódios são o fluxo de grãos, na parte intermediária do barranco e a queda de blocos, na parte superior. Para as camadas arenosas posicionadas na base do barranco o rompimento inicial da condição estável se dá pelo solapamento causado pela ação direta da corrente fluvial e da ação de ondas e enquanto que para a camada superior siltica-arenosa (sobre a qual desenvolve-se o solo) pelo solapamento causado pela remoção da areias subjacentes.



Foto 4. Foto evidenciando a atuação da erosão fluvial por corrasão, abaixo do nível do solo e das raízes. Neste local o talvegue se encontra adjacente à margem (Foco ME-26).



Foto 5. Ação conjugada de processos gravitacionais: fluxo de grãos e queda de blocos

As areias que constituem a porção central e mais espessa das margens, principalmente no caso do Cotinguiba-Pindoba, são caracteristicamente muito friáveis, não coesivas, e se movimentam barranco abaixo através do mecanismo de fluxo de grãos. Atribui-se a facilidade de ocorrência deste tipo de movimento de massa não apenas às características geotécnicas das areias, mas também ao rebaixamento do lençol freático, diminuindo em muito o teor de umidade das mesmas, e, conseqüentemente, o seu grau de estabilidade. Anteriormente à diminuição da freqüência das cheias, teoricamente este processo deveria ter uma menor magnitude e freqüência em relação ao que ocorre nos dias atuais.

Margens de constituição mista (Margem Tipo E - Betume) são de constituição mista, consistindo em camadas intercaladas (interestratificadas) de materiais de várias granulometrias (argilas, siltes e areias), permeabilidade e coesão e são produtos depositados em fases anteriores do rio, refletindo as mudanças nas condições de vazão, de transporte e deposição de sedimentos pelo rio. Este tipo de margem é vulnerável a movimentos de massas no talude, mas em um grau inferior às margens totalmente não coesivas.

Em uma margem mista, a forma de estruturação das camadas de areias, siltes e argilas influencia no favorecimento ou resistência à erosão. A depender da posição ocupada pela camada ela pode estar posicionada exatamente no intervalo de flutuação do nível do rio ou pode ainda estar sendo submetida à ação da corrente principal. Nestes casos a susceptibilidade é grande quando a camada é arenosa e, ao contrário, a resistência à erosão é maior quando se tratam de sedimentos coesivos, os quais, inclusive, podem proteger parcialmente as camadas arenosas adjacentes.

Já as variações do nível do rio podem fazer com que em determinados estágios, camadas de resistências distintas, sejam atingidas pela ação erosiva do fluxo e/ou das ondas. Além disso, a posição relativa entre camadas coesiva e não coesivas pode favorecer o desencadeamento de movimentos de massas, à medida que as partículas são removidas pela erosão marginal.

Margens formadas por obras de engenharia (margens Tipo D - Dique) correspondem aos diques de proteção construídos ao longo da margem direita do rio São Francisco com objetivo de proteger os perímetros irrigados contra as cheias e que, com o recuo da linha de margem foram atingidos em alguns trechos (ME-52, ME-18).

Atualmente, nestes trechos eles constituem a própria margem do rio. A resposta à atuação dos processos erosivos é semelhante a das margens de constituição mista. A presença de silte e argila na matriz destas areias proporcionam uma maior estabilidade geotécnica para este padrão de margem, diminuindo a ocorrência de movimentos de massas, em relação às margens não coesivas.

7.4 Fatores ligados a dinâmica estuarina e seus reflexos na erosão marginal

O nível do rio São Francisco é afetado diariamente pelas marés oceânicas, na medida em que a subida do nível do mar provoca o barramento natural do fluxo do rio. A elevação e abaixamento do nível da água doce do rio, em dois ciclos diários de maré alta e baixa, exercem um papel importante na promoção da erosão marginal fluvial. A influência da maré é percebida até as proximidades da cidade de Propriá (SE), distante 75 km da foz.

Aventa-se a hipótese de que a influência da maré rio acima aumentou após a regularização das vazões, não só em termos lineares, atingindo pontos um pouco mais à montante, mas também, e

principalmente, temporalmente, pois ampliou sua ação nos meses do ano em que anteriormente tinha pouca influência. A regularização do rio provocou a diminuição da frequência e da magnitude das altas vazões no verão, e inclusive, a ausência momentânea das mesmas desde 92, criando condições para o avanço da influência das marés rio acima.

Adicionalmente, o nível do rio permanece mais ou menos constante durante todo o ano, potencializando a ação da maré sobre a margem. Esta possibilidade tem repercussões no fenômeno da erosão marginal, na medida em que a ação das marés é um elemento importante na sua evolução.

As variações nas amplitudes das marés oceânicas, causadas por eventos astronômicos (marés de sizígia e marés de quadraturas) ou eventos climáticos episódicos (tempestades e ventos fortes) desempenham um papel importante ao alterar os valores normais de oscilação das marés no estuário, o que repercute em termos da potencialização dos seus efeitos erosivos no canal fluvial.

Isto significa que, no trecho inferior do rio, nos períodos das marés excepcionalmente altas de sizígia, o nível máximo da maré sobe entre 50 e 70 cm acima do máximo alcançado nas marés de quadratura. Significa também que as ondas produzidas durante a subida da maré vão atingir os barrancos situados mais distantes da linha d'água (pela presença de uma faixa de praia) ou níveis mais elevados dos barrancos (quando da ausência ou estreita faixa de praia). É desta forma que se explica o ataque erosivo em certos focos de erosão presentes nos segmentos I e II, como os ME-5/Saramen (Foto 6) e ME-16/Ilha Teresa, que é mais eficiente quando ocorre simultaneamente com os efeitos das marés excepcionais meteorológicas ou de equinócio.



Foto 6. Barrancos marginais só atingidos durante as marés excepcionalmente altas. As raízes expostas dos coqueiros marcam a posição anterior da linha de margem. Povoado Saramen (ME 5).

A subida do nível da maré, acompanhada pela produção de ondas, é responsável por vários efeitos erosivos e a produção de várias feições nas margens, atuando ou não em conjunto com a ação do fluxo fluvial. Sua atuação fica registrada sob a forma da faixa de intermarés nas praias fluviais, por reentrâncias na base dos barrancos e pela produção de micro escarpas na faixa de praia ou na base do barranco, em constante processo de desmoronamento e recuo.

Os processos que dão origem a estas feições são de duas naturezas: remoção (produz micro escarpas e reentrâncias) e redistribuição (faixa de praia e marcas de deixa). Para o fenômeno da erosão marginal interessa, sobretudo, o primeiro.

A remoção do material das margens tem, além da sua ação erosiva direta, uma conseqüência indireta, fundamental para manter a continuidade do processo evolutivo de recuo das margens:

a retirada de material que se acumulou na base do barranco proveniente das partes altas do barranco, evitando assim que a margem venha a atingir o seu perfil de equilíbrio. Se tal acontecesse, poderia levar a interrupção do processo de recuo da margem, até que outro agente (no caso, o fluxo do canal) provocasse alguma mudança.

Analisando-se em detalhe o processo de remoção, verifica-se duas formas de atuação:

- a) na primeira, a remoção direta das partículas individuais constituintes das argilas ou areias, promove o solapamento da base do barranco, e, com o passar do tempo, cria instabilidade na parte superior do barranco, que desmorona ou desliza, em formas de blocos maiores. Estes, ao caírem na zona de ação das ondas, entrarão novamente no ciclo erosivo, sendo desmembrados e removidos pelas ondas;
- b) na segunda, a remoção se dá pela formação de micro escarpas nas areias da faixa de praia ou nas areias acumuladas na base do barranco como resultado de movimentos de massa declive abaixo. Passo-a-passo, as micro escarpas vão recuando e permitindo a remoção de novas areias acumuladas na base do barranco em recentes episódios gravitacionais.

7.5 Atuação dos ventos na erosão das margens

Os ventos atuam de forma indireta na promoção da erosão marginal. Eles são em parte responsáveis pela formação das ondas e estas, sim, atuam diretamente na remoção de partículas das margens. A erosão direta do vento sobre o material arenoso das margens é pouco significativa em termos de taxa recuo, embora tenha sido observada, principalmente nos barrancos que constituem as margens das ilhas e barras entre Propriá e Pão de Açúcar.

A ação constante das ondas produzidas pelos ventos só é intensificada quando associada às marés meteorológicas - por ocasião de tempestades acompanhadas de ventos fortes - ou ainda, na coincidência de marés de sizígia e ventos fortes, quando podem exercer um papel mais decisivo na erosão marginal

Uma forma secundária de atuação dos ventos é a ação direta sobre os sedimentos arenosos friáveis expostos no topo das margens de barras emersas (não vegetadas), bem como sobre a face de barrancos desprovidos de cobertura vegetal devido à erosão recente. Nas observações de campo, verificou-se que quando o vento sopra diretamente sobre a margem constituída por areias, friáveis e secas, promove o transporte de nuvens de grãos e a formação de superfícies de deflação e acumulações eólicas (pequenas dunas).

O abaixamento do lençol freático provocado pela regularização do nível do rio e a ausência de altas vazões (com elevação do nível do rio), resulta em menor umidade nas areias constituintes das margens essencialmente arenosas, com diminuição da sua coesão, favorecendo a ação do vento na sua superfície exposta. No que se refere à erosão das margens, o resultado da ação erosiva dos ventos é insignificante na face do barranco.

7.6 Regime hidrológico natural do rio São Francisco, sua sazonalidade natural e o papel das enchentes na dinâmica fluvial

Aproximadamente 80% do total das suas águas do baixo curso do rio São Francisco provem das sub-bacias do alto São Francisco. A participação das sub-bacias afluentes do baixo São Francisco,

na sua maioria formada por rios intermitentes, normalmente não alcança 5 %, valor este que era ainda proporcionalmente muito menor antes de 1993, quando, nos períodos de enchentes, as vazões chegavam a atingir entre 4.000 e 12.000 m³/s.

Entretanto, algumas das enchentes de maior repercussão no baixo São Francisco se formaram devido a conjunção das altas vazões provenientes do Alto São Francisco, com precipitações pluviométricas anormais nos afluentes do Submédio, como foi o caso da grande enchente de abril de 1985 (CEEIVASF, 1985).

Os gráficos das variações interanuais evidenciam um padrão caracterizado pela extrema variabilidade das vazões, mas com a ocorrência sazonal, em praticamente todos os anos no período de 1926 a 1976, de picos de médias mensais acima de 4.000 m³/s, entre os meses de dezembro de um ano a março do ano seguinte.

As enchentes anuais aportavam, além de grande volume de material em suspensão e nutrientes para a ictiofauna, partículas arenosas como carga de fundo. Desta forma, desempenhavam um papel importante na reposição do material removido anteriormente pela erosão fluvial. Por outro lado, as fortes correntezas provocavam a remobilização do material arenoso anteriormente depositado no leito.

É neste estágio que ocorria a maior mobilidade das barras arenosas, inclusive aquelas que se encontravam anteriormente emersas, promovendo muitas mudanças na geometria do talvegue, e conseqüentemente, nos sítios diretamente sujeito a ação direta e intensa do fluxo do canal. Ocorria, portanto, uma renovação anual, irregularmente distribuída ao longo dos anos, na medida em que alternavam-se as características e intensidades das cheias.

Desde 1994, condições desta natureza não são observadas no baixo São Francisco, o que portanto permite descartá-las como promotoras da atual fase erosiva acelerada. A última cheia ocorreu em 1992. Cabe ressaltar, que a ocorrência de cheias futuras não está descartada e poderão, portanto, vir ainda a interferir na dinâmica fluvial e dos processos erosivos associados.

7.7 Fatores antrópicos relacionados com a construção e operação das barragens e ao novo regime hidro-sedimentológico

Dentre os diversos usos das águas do Rio São Francisco rio acima, o que mais diretamente afeta o seu baixo curso, é, sem dúvida alguma, aquele relacionado à geração de energia elétrica, não só pela necessidade de construção de barragens e formação de grandes reservatórios, mas também pela sua forma de operação, resultando em alterações do padrão e características dos fluxos efluentes das usinas hidrelétricas.

Cinco aspectos destas alterações exercem influência direta ou indireta sobre a hidrodinâmica fluvial do baixo curso do São Francisco, e, conseqüentemente sobre a erosão marginal: a drástica diminuição da carga sólida; a elevação das vazões mínimas; a manutenção de vazões aproximadamente constantes durante longos períodos (regularização); a alteração da sazonalidade e o controle das cheias.

Para efeito da análise da influência exercida pelas barragens sobre o regime hídrico e sedimentológico do rio São Francisco, foram considerados três períodos:

O primeiro período (1978-1987) corresponde à fase em que se iniciou a influência da Barragem de Sobradinho sobre o regime hidrosedimentológico de todo o estirão do rio à jusante, inclusive o baixo São Francisco, mas que ainda era afetado pelas eventuais contribuições dos afluentes situados no SubMédio São Francisco, apesar da existência das barragens de Moxotó e Paulo Afonso. Sobradinho representa um marco na história hidrológica e sedimentológica do São Francisco e representa a mais significativa intervenção e controle do homem sobre estas condições.

O segundo período (1988-93), corresponde à fase em que são somadas as participações de Sobradinho e Itaparica, além de Paulo Afonso IV e Moxotó (este, um reservatório de regularização semanal), ampliando o controle sobre as vazões e a retenção de sedimentos no trecho abaixo de Sobradinho. Para o baixo São Francisco esta fase reveste-se de importância, pois, além de significar uma maior redução no aporte de sedimentos, representa um maior controle sobre as altas vazões e eventuais cheias, cuja gênese está relacionada à contribuição dos afluentes do submédio São Francisco. Quanto à carga sedimentar e de nutrientes, além da sucessiva retenção promovida por cada barragem, a ausência de descarregadores de fundo impossibilita uma reposição, mesmo que parcial.

O terceiro período (1994-2001), correspondente à fase sob influência direta da UHE de Xingó. Pela sua posição e influência, Xingó pode ser considerada como uma nascente artificial do rio para o trecho compreendido até a Foz, que a rigor não pode mais ser considerado um rio natural. Apesar de Xingó ser uma usina que trabalha a fio d'água, ela representa um marco significativo na artificialização e controle das condições hidrosedimentológicas do trecho compreendido até a foz.

Primeiro, por reter a pequena contribuição de sedimentos aluviais do trecho Paulo Afonso-Xingó, o que representa o elo final da cadeia de bloqueio da quase totalidade das partículas provenientes de rio acima. Segundo, porque, sua operação produz flutuações artificiais das vazões diárias que desempenham um papel importante na dinâmica atual do rio.

Em termos práticos, para o trecho do baixo São Francisco entre Xingó e a foz, é esta hidrelétrica que controla praticamente todo o fluxo do rio, na medida em que é mínima a contribuição dos afluentes situados à jusante da mesma. Apesar disso, faz-se a ressalva que o controle real encontra-se em Sobradinho, pois a operação de Xingó é totalmente dependente das liberações de água por parte daquela usina hidrelétrica.

Apesar da operação do sistema de barragens não ser totalmente independente das flutuações das condições climáticas e hidrológicas naturais, elas já apresentam um alto grau de controle e um elevado nível de regulação nos períodos em que estas condições não excedem os limites normais. Convém ressaltar que esta afirmativa é reforçada pela ínfima contribuição em termos de descargas líquidas e sólidas que o rio São Francisco recebe de seus afluentes, tanto de margem esquerda quanto direita, situados no segmento da bacia abaixo da barragem de Xingó.

7.8 Variação interanual das vazões após 1978: as alterações na sazonalidade natural do rio e o controle das enchentes e as conseqüências para o processo de erosão marginal

A observação das variações interanuais das vazões médias mensais nas estações fluviométricas do baixo São Francisco permite constatar que no período imediatamente posterior à construção da barragem de Sobradinho (1978-1987) ocorreu uma elevação das vazões mínimas, mas que permaneceram os fortes picos anuais de vazão característicos do verão. Apesar de grande

capacidade de regularização de Sobradinho, as cheias continuaram a ocorrer anualmente, atingindo vazões médias da ordem de 6.000 m³/s em praticamente todos os anos do período.

De fato, a frequência das enchentes no Baixo São Francisco foram substancialmente reduzidas após 1987-1888, época que coincidente com a construção da barragem de Itaparica. A barragem Itaparica que possui uma pequena capacidade de regularização (variação de 5,00 na cota), desempenha um papel importante na retenção das vazões produzidas no submédio São Francisco, abaixo de Sobradinho, e que eram, ciclicamente, as responsáveis pela potencialização de cheias, com a de 1985.

Desde 1988, só se verificou a ocorrência de apenas uma cheia, em 1992, quando a vazão média atingiu 10.000 m³/s, e um pequeno evento no ano seguinte, quando atingiu aproximadamente 5.000 m³/s.

O período pós-construção de Xingó (1994-2001) foi marcado pela total ausência de cheias ou mesmo de picos de vazões elevadas. Este fato levou à falsa conclusão por parte de diversos técnicos e da população ribeirinha, de que cheias não mais ocorrerão no baixo São Francisco, devido ao controle das vazões. Existe inclusive um relacionamento equivocado entre o aparente desaparecimento das cheias e a construção da barragem de Xingó. De fato, existe uma coincidência temporal entre os dois fatos, mas Xingó não é responsável, conforme já exposto, pela contenção de eventuais cheias.

Por outro lado, apesar de desde 1993 estar-se atravessando um período de menor precipitação pluviométrica, não há nenhuma grande mudança climática/pluviométrica (Oliveira, 2000) nas cabeceiras da bacia que apontem para a impossibilidade da produção no futuro de grandes volumes de água provenientes das chuvas (inclusive aqueles de período de retorno superior a 10 anos) e que venham a superar o volume de espera da barragem de Sobradinho, tornando necessária a elevação das vazões efluentes. A depender do volume de água envolvido, tal elevação poderá vir a se configurar sobre a forma de enchentes no Baixo São Francisco.

Em relação às variações sazonais anuais, verifica-se que nos últimos 10 anos, a regularização fez com que as vazões médias mensais se situassem, na maior parte do tempo, abaixo ou próximo de 2.000 m³/s, valor este que corresponde aproximadamente a média das vazões mínimas mensais do período de baixas vazões, eliminando assim a sazonalidade anual e deixando de obedecer ao calendário natural.

Um aspecto a destacar no estudo da erosão marginal no baixo São Francisco, após a construção da cascata de barragens: a longa duração da vazão regularizada implica na permanência do nível do rio em um determinado patamar durante um período muito longo, em níveis médios relativamente elevados em relação às suas condições anteriores.

A relativa estabilidade do fluxo, tem várias implicações para a desestabilização das margens constituídas por sedimentos. Vários autores afirmam que a duração de uma descarga em particular é sempre mais importante que a sua magnitude ou que a ocorrência de vazões de cheias, exceto no caso de fluxos muito grandes.

Cabe destacar, nas relações com os taludes marginais, os possíveis resultados advindos da manutenção do nível do rio, em um determinado nível, durante muito tempo.. Enfim, por uma complexidade de fatores, é de se supor que dificilmente se encontraria o nível de regularidade e

constância que se observa hoje. O regime natural permitia anteriormente ao próprio ambiente fluvial encontrar novas formas de equilíbrio e de interação com os limites do canal que não necessariamente resultavam em erosões marginais persistentes e pronunciadas, como as observadas nas últimas décadas.

Outras implicações são derivadas das posições dos fluxos principais, e, em conseqüência, as posições que os respectivos talvegues ocupam em planta. Faz parte da dinâmica natural do rio as modificações na posição do talvegue, após as grandes enchentes. Estas mudanças da linha de talvegue podem ter várias implicações, mas convém destacar que provavelmente impedia, em muitos casos, que uma linha de maior velocidade de fluxo permanecesse na mesma posição durante vários anos seguidos, uma vez que eram constantes a abertura de novos trajetos, o que provocava o abandono de locais submetidos a erosão.

A permanência da incidência da linha de fluxo principal sobre um determinado trecho da margem submetida à erosão e o conseqüente somatório das taxas de recuo da margem ao longo dos anos, pode resultar em um valor mais expressivo do que seria de se esperar em um quadro natural. Este fenômeno foi particularmente observado na faixa correspondente ao Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.

Chama a atenção que este contexto não se aplica a todas as situações. Por vezes ocorre exatamente o oposto: em alguns trechos do rio foram identificadas pequenas mudanças atuais nos trajetos dos talvegues como conseqüência da migração recente de barras arenosas e do assoreamento provocado pela remobilização dos sedimentos do canal e dos materiais retirados das margens pela erosão. Este é um claro sinal do estado de não equilíbrio por que passa atualmente este segmento do rio.

Isto significa que as mudanças nas posições do talvegue continuam a ocorrer, embora em um ritmo menor, impulsionadas não pelas grandes vazões, mas por uma vazão efetiva que possibilita o transporte de carga de fundo (areias), com a conseqüente migração de pequenas dunas subaquosas e barras arenosas no leito do canal. Estas formas instáveis estão atualmente em constante deslocamento.

Nas condições atuais as barras formadas atualmente permanecem sempre submersas (a não ser em episódios excepcionais, como o que resultou do racionamento na produção de energia elétrica, em 2001), enquanto aquelas que foram formadas em uma condição anterior de nível mais elevado do rio (cheias), hoje permanecem emersas, mas inativas, transformando-se em verdadeiros terraços fluviais ou em ilhas, sendo paulatinamente colonizadas pela vegetação.

7.9 Como as oscilações artificiais influenciam na erosão marginal

As flutuações diárias e mensais do nível rio após a entrada em operação das usinas hidrelétricas se fazem sentir com maior intensidade no trecho do rio entre a UHE Xingó e Própria (Foto 7).

Os dados analisados permitem mostrar que os níveis d'água do rio São Francisco, principalmente no trecho entre Xingó e Própria, são fortemente influenciados pelas regras de operação da Usina de Xingó e promovem oscilações diárias e semanais de amplitudes variando entre 20 e 60 centímetros (Figura 19).



Foto 7. A foto registra a ação das ondas, durante elevação artificial do nível do rio. Margem do rio São Francisco, próximo a Gararu. Dia 13/09/01.



Figura 19. Oscilações do nível do rio no período de 01 a 31/07/2001

imperceptíveis, devido a maior influência e a maior amplitude alcançada pelas marés naturais.

7.10 Retenção dos sedimentos nas barragens e as alterações no transporte sedimentar à jusante

Quanto à carga de fundo, a pequena contribuição advinda do trecho entre as barragens Paulo Afonso e Xingó deposita-se na porção mais à montante do reservatório, não tendo possibilidade de entrar nas tomadas d'água das turbinas da usina de Xingó, situadas a 138,0 metros de altura. A única possibilidade de mudança neste quadro, principalmente em relação à carga suspensa, é a ocorrência de episódios de altas vazões por ocasião de chuvas excepcionais no alto, médio ou submédio São Francisco, implicando em uma drástica diminuição do tempo normal de permanência da água no reservatório.

Entre os diversos impactos resultantes da construção de grandes barramentos em um rio, a retenção no reservatório de grande parte dos sedimentos provenientes de montante, modifica substancialmente as características dos fluxos efluentes da barragem e interfere na dinâmica do segmento do rio situado a jusante da barragem (Figura 20).

Neste trecho do rio, a oscilação diária do nível do rio provoca a elevação do nível do lençol freático, que associada à ação das ondas produzidas pelos ventos, promove a remoção das partículas arenosas constituintes das margens sedimentares e produz uma micro escarpa na base do talude.

Esta ação é importante na desagregação dos blocos desmoronados presentes na base do talude e na remoção das suas partículas constituintes, facilitando o reinício do ciclo erosivo do barranco e é um importante fator potencializador da ação das ondas. Na ausência desta oscilação do nível do rio, as ondas teriam sua faixa vertical de ação bastante reduzida.

No trecho à jusante de Propriá, as flutuações do nível do rio ocorrem em função da associação entre as oscilações artificiais e as marés naturais, as quais ocasionalmente podem ter seus efeitos somados, quando da coincidência dos seus respectivos picos de elevação. Entre Neópolis/Penedo e a foz, a influência das flutuações normais da vazão regularizada são praticamente

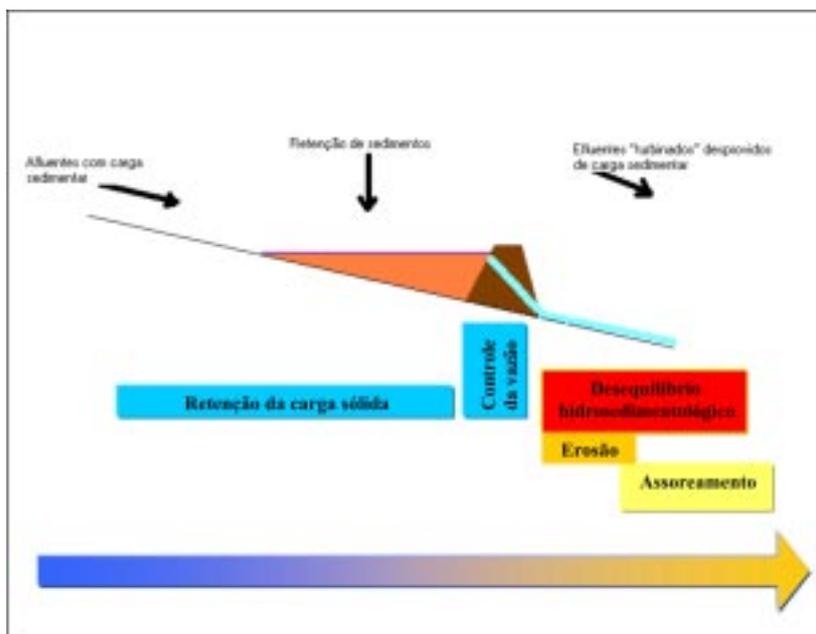


Figura 20. Esquema simplificado do papel exercido pela barragem de Xingó na retenção da carga sólida.

No caso específico do rio São Francisco, uma grande parte da carga sólida fica retida em Sobradinho e na cascata de barragens rio abaixo. A barragem de Xingó representa o elo final da cadeia de retenção de sedimentos provenientes de montante. Rio abaixo de Xingó a água excessivamente límpida e as medições efetuadas durante o programa de monitoramento ambiental da usina (CHESF, 1997), indicam uma retenção quase total da carga em suspensão (Quadro 4).

Quadro 4. Alterações na carga total de sedimentos transportada anualmente no baixo curso do rio São Francisco

PERÍODO PRÉ-BARRAGEM DE SOBRADINHO		
P. DE AÇÚCAR (1)	66 – 68	12 (x 10 ⁶ ton. / ano)
PERÍODO PÓS-BARRAGEM DE SOBRADINHO		
FOZ (2)	1983	6 (x 10 ⁶ ton. / ano)
PERÍODO PÓS-BARRAGEM DE XINGÓ		
PROPRIÁ (3)	2000	0,466 (x 10 ⁶ ton. / ano)

(2) Milliman (1983) e (3) PROJETO GEF SÃO FRANCISCO/UFAL

Fontes de dados: (.1) OEA/PLANVASF(1986). Modificado de Oliveira (2001).

Comparando-se os dados atuais com aqueles obtidos em anos anteriores, verifica-se uma notável diminuição da carga transportada, pois estes valores representam apenas 3,8% da carga sólida total transportada antes da implantação das barragens rio acima (12 x 10⁶ t/ano) e 6,8% da carga sólida transportada após a implantação da barragem de Sobradinho, porém antes da construção de Itaparica e Xingó.

Na medida em que as partículas sólidas ficam quase que totalmente retidas nos reservatórios rio acima, apresenta-se a questão: de onde provem atual carga sedimentar transportada pelo rio? Possivelmente esta pequena produção se deve ao material retirado pela erosão das margens da calha principal do rio, das margens de ilhas e barras emersas, da erosão do próprio leito do rio e, em pequena escala da erosão dos solos das sub-bacias afluentes.

A contribuição advinda da erosão das margens foi ressaltada por Casado (2000), Considerando a existência de mais de setenta focos erosivos marginais no trecho do rio entre Xingó e a foz, é possível ter-se uma idéia de que é grande o volume total retirado das margens. Estudos posteriores poderão vir a calcular o volume total erodido nos últimos anos, mediante o estudo de imagens aéreas e de satélite.

Quanto às respostas do canal à diminuição no aporte de carga sólida, o desencadeamento de processos erosivos e de assoreamento ao longo estirão do rio situado à jusante da barragem de Xingó são evidências do complexo reajustamento da morfologia do canal em busca de um novo equilíbrio dinâmico.

7.11 Papel exercido pela cobertura vegetal

Os desmatamentos prejudicam, em parte, a estabilidade de suas margens, mas não exercem um papel direto no que se refere à disseminação do processo erosivo marginal. As causas da erosão no baixo curso do rio São Francisco, não estão relacionadas ao desmatamento e sim as alterações no comportamento atual da dinâmica fluvial e estuarina, e, na maior parte dos casos, independem da existência ou não de cobertura vegetal nas margens.

A vegetação que recobre a face do barranco marginal ou sua base (ao nível do rio) desempenha um papel importante de proteção da margem apenas quando a linha de maior velocidade do canal/talvegue não se encontra próxima à margem ou quando a ação das ondas provocadas pelas marés excepcionais não é relevante ou ainda quando a ação da flutuação artificial do nível do rio promovido pela operação das barragens não se fez sentir com intensidade.

Mesmo quando a erosão se instala devido a ação destes agentes, a proteção vegetal tem o mérito de retardar a ação erosiva, mas apenas no seu estágio preparatório ou na abertura de um do foco erosivo inicial. Dito de outra forma, a ausência de vegetação, ao inverso, constitui um fator facilitador para o avanço rápido dos processos erosivos.

Ressalte-se que no caso das margens não coesivas, a exposição da areia, sujeita-a a um mais rápido avanço da erosão, não só devido à ação direta das águas do rio, mas também pela deflagração de processos gravitacionais. Assim, enquanto a cobertura vegetal resiste, é inibidora da erosão das margens.

Nesta região, a erosão provocada pelo escoamento superficial não é a responsável pela erosão das margens. Assim, a mata ciliar (topo da margem) apesar de ajudar a proteger o solo da erosão pluvial e facilitar a infiltração da água no solo, não impede a erosão fluvial, uma vez esta instalada em função em função das dinâmica estuarina e fluvial, sendo, na realidade, mais uma vítima da mesma.

Quanto à importância a manutenção da mata ciliar, destaca-se entre as razões para mantê-la, o fato de fornecer alimento e sombra para os pescadores e peixes, sendo que esta função torna-se relevante diante da carência de nutrientes nas águas límpidas do rio. O aspecto paisagístico também deve ser lembrado, pois o embelezamento da paisagem desponta como uma motivação a mais para mantê-la, na medida em que estimula o surgimento e desenvolvimento do turismo ecológico na região (Foto 8).



Foto 8. Margem estável com desenvolvimento de aninga e balseiro. Margem próxima à Ilha das Flores.

A recomposição da mata ciliar, além disso, poderia ajudar na proteção do solo, diminuição o escoamento superficial e aumentando a infiltração das águas pluviais para o lençol freático. Um amplo programa de recuperação da mata ciliar e da sua conservação, caso venha a ser executado na região, também contribuiria para a educação ambiental e a mudança de postura dos ribeirinhos e proprietários rurais, incentivando todos a dispensar um melhor tratamento ao rio.

A revegetação dos trechos afetados pela erosão deverá ser precedida da aplicação de medidas que garantam a contenção da erosão e da estabilização das margens em relação à dinâmica fluvial. Mas, uma vez a margem estabilizada é fundamental a sua revegetação como forma de proteção contra a ação das ondas e dos desmoronamentos (ação gravitacional).

8. SÍNTESE DA DINÂMICA E EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS MARGINAIS

Na maior parte dos trechos de margens sob erosão, é difícil dissociar a ação das ondas, da ação das marés (ambas relacionadas com a oscilação do nível do rio) e da ação direta da corrente fluvial, na medida em que estes processos atuam concomitantemente e/ou de forma complementar e o produto resultante é o mesmo, isto é, a erosão e, portanto, o recuo das linhas de margens.

As três naturezas distintas de processos erosivos que atuam em conjunto para promover a erosão nas margens do baixo curso do rio São Francisco são: a) relacionados à hidrodinâmica do canal, b) relacionados à dinâmica do estuário e as oscilações artificiais do nível do rio e c) relacionados ao comportamento geotécnico do barranco (talude marginal). Eles atuam respectivamente em três posições, em relação à superfície da água: abaixo do nível do rio (subaquoso), ao nível do rio e acima deste (subaéreo) (Figura 21).

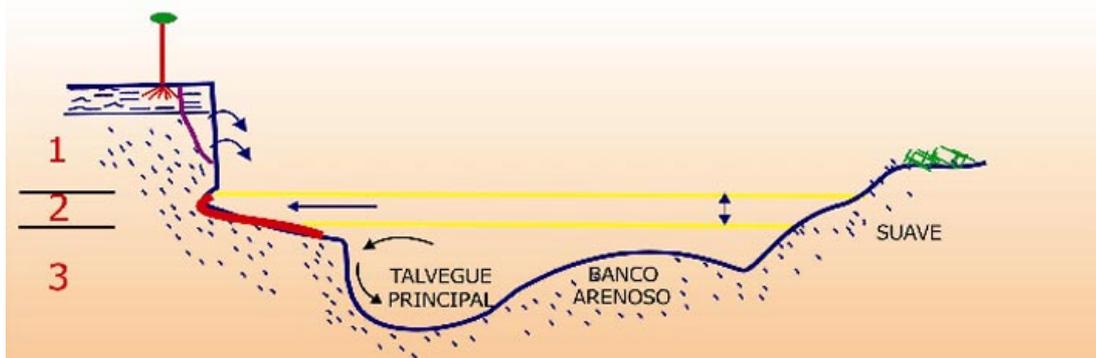


Figura 21. Síntese da atuação dos conjuntos de processos erosivos

O primeiro conjunto de processos está diretamente relacionado com a geometria hidráulica do canal e com a ação direta da corrente fluvial, e se traduz através da retirada de partículas pelo fluxo (corrasão), pela pressão exercida contra as paredes do lado externo (côncavo) das curvas do talvegue e pela produção de fluxos secundários transversais em direção à margem sob erosão.

O segundo está relacionado com a dinâmica do estuário e a interação com as oscilações do nível do rio produzidas artificialmente pela operação da Usina Hidrelétrica de Xingó. A dinâmica do estuário é responsável pela produção de ondas durante os ciclos diários de subida das marés que promovem o solapamento e a retirada dos materiais da base dos barrancos (Figura 22).



Figura 22. Dinâmicas ambientais as quais relacionam os conjuntos de processos erosivos: fluvial e estuarina.

Estas ondas atuam ao mesmo tempo que as ondas produzidas pelo vento. As marés de sizígia, equinócio e as meteorológicas, ao elevar o nível do rio, possibilitam que a erosão venha a atingir níveis mais elevados do barranco (por vezes incidindo sobre níveis menos coesivos, e portanto, mais susceptíveis à erosão) e margens que normalmente se encontram distantes da linha d'água, isto é, com uma larga faixa de praia entre o barranco erosivo e o rio (Margens tipo Saramen).

Concomitantemente às estas flutuações naturais do nível do rio, somam-se as oscilações artificiais (diárias, semanais, mensais e anuais) produzidas pela operação das usinas hidrelétricas de montante, as quais são responsáveis pela ação das ondas associadas à subida do nível e as conseqüentes variações do lençol freático que contribuem para facilitar a erosão na base do barranco.

E o terceiro, consistindo em movimentos gravitacionais nos barrancos, ocorre com a participação indireta da água do rio, que é responsável pelo estágio inicial de solapamento e desestabilização. Em margens altas (Margens tipo Cotinguiba-Pindoba) e com diferenças de comportamento geotécnico entre os níveis não coesivos (areais friáveis) e semicoesivos (siltes) o recuo das margens ganha uma dinâmica própria, sem a participação da água do rio, durante um determinado estágio do ciclo erosivo.

A atuação associada destes três conjuntos de processos é a responsável pelas taxas de erosão mais efetivas, se as demais condições de suscetibilidade à erosão forem atendidas. O caso típico é o trecho da margem direita situado no Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, onde se atinge a máxima eficiência do processo e velocidade de recuo das margens por erosão devido a uma coincidência de fatores predisponentes.

Este modelo não se aplica no caso das margens do Tipo A (Pontal da Barra) e B (Saramen), pois a erosão nestes casos não está associada a ação da corrente fluvial (sub aquosa). Ela ocorre no

nível de intermarés, e apenas por ocasião das marés excepcionalmente altas, pela ação direta das ondas. A erosão na base dos barrancos arenosos e não coesivos provoca movimentos gravitacionais, como queda de pequenos blocos e fluxo de grãos arenosos, resultando no recuo dos mesmos e com a exposição de raízes e a derrubada de árvores.

8.1 Síntese quanto ao papel exercido pela flutuação do nível do rio e dos movimentos gravitacionais no ciclo erosivo

A ação das ondas promove inicialmente o solapamento da base do barranco. Ao produzir reentrâncias, provoca a instabilidade da parte superior do barranco. Em função da condição de instabilidade criada, movimentos de massa ocorrem com certa frequência, sob a forma de desmoronamento de blocos ou, eventualmente, deslizamentos.

O material movimentado acumula-se na base do barranco onde fica sujeito saturação dos poros pela água devido à subida do nível do rio e passa a sofrer a ação erosiva direta das ondas. Ao cair na zona da ação das ondas, o material será removido da base do barranco e transportado por correntes secundárias para a corrente principal do canal fluvial.

Esta ação é facilitada pela presença de areias saturadas, que sofrem sucessivos desmoronamentos, com a queda de pequenos blocos arenosos, o que resulta na formação de micro escarpas na base do barranco/margem a cada subida do nível do rio (seja devido à maré natural ou oscilação artificial devido à operação da Usina de Xingó).

Esta ação conjugada destes processos geralmente resulta na formação de um perfil íngreme, verticalizado, para o barranco. Com os contínuos desmoronamentos e deslizamentos a tendência é aumentar durante um certo tempo a quantidade de material na base do barranco, formando uma espécie de “franja” ou “talus” bastante visível, alterando o perfil transversal, que passa a apresentar uma certa convexidade. Com a continuidade da ação das ondas e a ocorrência de fluxos gravitacionais, o perfil volta a ser verticalizado, completando o ciclo.

Assim, esta remoção desempenha um papel importante para a continuidade do processo evolutivo de recuo das margens, ao evitar que a margem atinja um perfil de equilíbrio. Se tal não acontecesse, poderia interromper o processo de recuo da margem até que outro evento provocasse a retomada do ciclo erosivo.

A ação dos fluxos gravitacionais é mais eficiente nas margens não coesivas (arenosas) e mais altas. Ocasionalmente, a ocorrência de uma camada de comportamento mais coesivo (siltico-arenosa) na porção superior do barranco, contribui para acelerar o processo de recuo da margem e verticalização do perfil. Quando o material imediatamente subjacente a esta camada é arenoso e não coesivo, friável, constantemente é removido através da deflagração de fluxos de grãos.

A remoção do material da base da camada superior provoca a sua desestabilização, gerando a abertura de fendas de tensão que provocam a queda de blocos. Estes blocos, alguns contendo porções de solo, gramíneas e, por vezes, árvores, quando atingem a base do barranco passam a sofrer a ação da água do rio, inicialmente da saturação dos poros durante a subida do nível da água e do impacto das ondas associadas

8.2 Síntese quanto ao papel exercido pela ação da corrente fluvial na evolução da erosão das margens

O contínuo trabalho de remoção subaquosa das partículas pela corrente principal cuja trajetória coincide com o talvegue, é, em última instância, o grande responsável pelo recuo das linhas de margem. Sem esta remoção não haveria continuidade do processo, pois a tendência seria do barranco atingir um perfil de equilíbrio, estabilizando a margem.

O material removido é, em parte, redepositado imediatamente a jusante, promovendo o acúmulo de sedimentos arenosos no leito do canal, formando novos bancos arenosos submersos. A formação e contínua migração de novos bancos/barras arenosas submersas ocupando muitas vezes a maior parte do canal provoca transtornos à navegação. Este fato foi particularmente observado no caso do trecho do Cotinguiba-Pindoba.

8.3 Tipo de dinâmica ambiental controladora da erosão e sua influência na temporalidade da erosão marginal

Os conjuntos de processos erosivos resultantes da ação da água (na zona de intermarés e subaquosos) estão diretamente condicionados ou à dinâmica fluvial ou à dinâmica estuarina. A primeira atua no sentido montante-jusante e a segunda no sentido inverso, isto é, de jusante (foz/oceano) para montante.

Dois padrões de margens foram identificadas em relação a forma de atuação temporal dos processos dominantes e que estão intimamente relacionados às dinâmicas ambientais que os promovem:

Nas margens sob erosão contínua o principal controle da erosão é a dinâmica do canal, o processo dominante é a ação da corrente fluvial (atinge as margens dos Tipos A,C,D e E), traduzida pela presença do talvegue adjacente à margem. Os demais fatores e processos exercem, entretanto um papel auxiliar fundamental pois são os agentes imediatos e efetivos de recuo e retirada de material das margens.. A erosão nestas margens ocorre de forma contínua, no dia-a-dia, e é fortemente influenciada pela ação de ondas no intervalo de flutuação do nível do rio. Esta flutuação pode ter duas origens: uma natural relacionada a dinâmica do estuário (reflexo das marés) e outra artificial, promovida pela operação da Usina de Xingó.

Nas margens sob erosão episódica, a erosão ocorre apenas ocasionalmente, estando sujeitas à erosão promovidas pelas ondas apenas por ocasião de eventos episódicos como marés excepcionalmente altas de sizígia, de equinócio e marés meteorológicas (atinge as margens dos tipos B e E, distribuídas no segmento do rio entre Ilha das Flores e a foz). A renovação do ciclo erosivo ocorre apenas nestas ocasiões.

8.4 Ciclo evolutivo das margens sob erosão contínua

A observação detalhada de margens sob erosão contínua que se encontravam em diferentes estágios evolutivos em relação às respostas aos processos erosivos permitiu reconstituir a seguinte seqüência evolutiva: a) Estágio preparatório; b) Estágio erosivo inicial; c) Estágio de erosão ativa; d) Estágio de estabilização temporária; e) Estágio de renovação do ciclo.

No estágio preparatório, não ocorre ainda o recuo da margem, mas nota-se uma pequena clareira na vegetação que recobre a base e a face da margem, resultado da sua retirada pela ação da corrente fluvial.

O estágio erosivo inicial envolve a formação de um foco inicial de erosão, situado entre porções com remanescentes da vegetação ciliar. Este comportamento está relacionado com a formação de correntes secundárias geradas à partir da incidência de frentes de ondas em direção a margem e pela aproximação da corrente principal/talvegue em direção à margem.

O estágio de erosão ativa é muitas vezes marcado inicialmente por um pronunciado solapamento basal no barranco marginal diretamente pela ação da corrente fluvial, associado com ação de ondas. Aos poucos, o solapamento basal fica menos pronunciado devido ao acúmulo de material desmoronado na base que, ao dar origem a uma estreita faixa de praia, modifica a forma de atuação da erosão. Esta passa a ocorrer principalmente pelo espraiamento e embate das ondas durante a subida do nível do rio sobre o material desmoronado presente na base do barranco, apesar da erosão pela corrente fluvial continuar a ocorrer de forma subaquosa, agora, um pouco mais distante da escarpa/barranco marginal.

O estágio de estabilização temporária ocorre quando o elevado acúmulo de material proveniente das partes mais altas do barranco resulta em um perfil suavizado e uma condição de estabilidade temporária. Apesar disto, permanece o lento e contínuo trabalho diário de remoção de partículas promovido pelas ondas e secundárias correntes associadas.

O estágio de renovação do ciclo ocorre à partir da retomada do perfil verticalizado do barranco, após a remoção do material desmoronado acumulado na base.

9. COMPARTIMENTAÇÃO DO SISTEMA FLUVIAL E SUA INFLUÊNCIA NOS AJUSTES MORFO-DINÂMICOS DO CANAL, EM RESPOSTA ÀS ALTERAÇÕES NO REGIME HIDRO SEDIMENTOLÓGICO

Uma visão abrangente tanto do ponto de vista espacial como temporal, se faz necessária, pois as respostas morfo-sedimentares não estão ocorrendo de forma linear ao longo do estirão do canal à jusante de Xingó. Concluiu-se que estas respostas dependem dos condicionantes morfo-estruturais e da história geológica que condicionou a evolução geológica-geomorfológica do sistema fluvial e do sistema litorâneo.

É justamente a falta desta perspectiva histórica dos processos de erosão sedimentação, que tem levado à divulgação de conclusões precipitadas sobre a perda de equilíbrio dos sistemas fluviais. As severações categóricas de que “o rio está em fase de assoreamento”, por um lado, ou “desequilibrado, porque erosiona suas margens”, por outro, não levam em conta as formas de propagação dos ajustes produzidos pelo impacto antrópico nas variáveis morfológicas assim como tampouco nas biológicas.

Respostas lineares são típicas do raciocínio atualístico onde para uma ação antrópica o rio responde linearmente. A elaboração de um modelo para o baixo curso do Rio São Francisco teve como premissa de que um sistema de grande porte como este oferece respostas morfo-hidráulicas complexas as regulações de sua carga sedimentar e regime de fluxos produzido pelo homem

Conclui-se que o baixo do rio São Francisco à jusante de Xingó caracteriza-se por uma evolução controlada por uma compartimentação morfo-sedimentar, podendo ser dividido em 5 compartimentos geomorfológicos (Figura 23), definidos por controles litológicos, topográficos e estruturais.

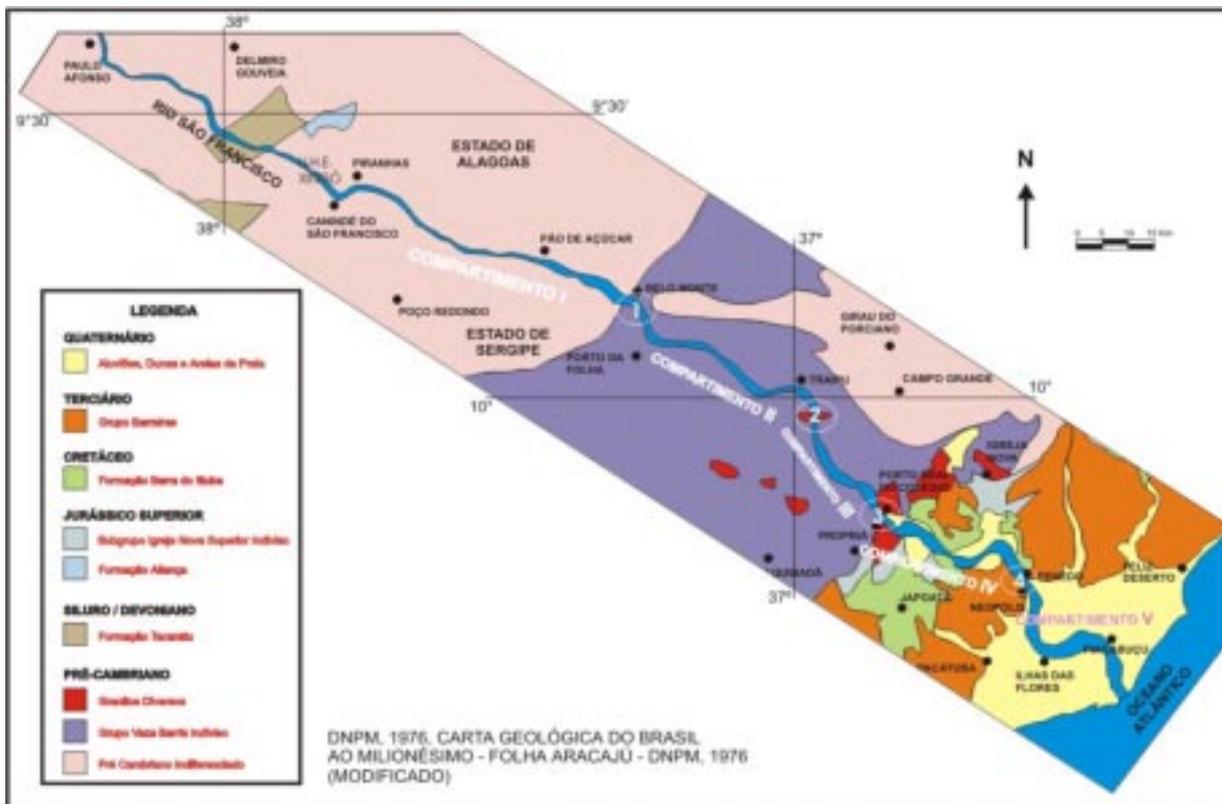


Figura 23. Compartimentação geomorfológica do Baixo São Francisco.

O compartimento I se estende desde a barragem de Xingo até alguns quilômetros a jusante de Belo Monte. A característica mais marcante deste compartimento é que o rio São Francisco encontra-se encaixado num “canyon” (Foto 9) que desenvolve-se, por sua vez, encaixado em uma superfície pediplanizada (pediplano sertanejo), com substrato formado por rochas ígneas pré-cambrianas. Este compartimento atua fundamentalmente como corredor de sedimentos não sendo registradas feições deposicionais fluviais de importância



Foto 9. “Canyon” do São Francisco no compartimento I.

No compartimento II o rio São Francisco desenvolve-se encaixado em uma superfície de baixos planaltos dissecados, formando um relevo de morros, sobre rochas metamórficas da faixa de dobramentos Sergipana de idade pré-cambriana, estendendo-se desde Belo Monte até o nodo de Lagoa do Monte. São raros os depósitos fluviais formados pelo canal, basicamente barras arenosas laterais anexadas às margens.

O compartimento III se desenvolve a partir do nodo de Lagoa do Monte até Porto Real do Colégio/Propriá, onde se encontra o contato com rochas sedimentares clásticas cretáceas da Bacia Sedimentar Sergipe-Alagoas. O padrão de canal neste compartimento é ligeiramente sinuoso e com canal entrelaçado (braided) com ilhas e barras arenosas. Em geral o rio apresenta baixo coeficiente de entrelaçamento, com um canal principal e um ou dois secundários ao redor das ilhas principais. Este segmento não apresenta uma planície aluvial bem desenvolvida, embora existam pequenas áreas acrecionadas às margens.

O compartimento IV desenvolve-se desde Porto Real do Colégio/Propriá até Penedo/Neópolis) e corta principalmente a área de tabuleiros costeiros formados sobre as rochas sedimentares terciárias da Formação Barreiras e as cretáceas da Formação Penedo.

À partir de Propriá, o rio São Francisco corta rochas mais brandas apresentando-se menos encaixado e desenvolvendo uma planície aluvial bem mais larga que nos compartimentos anteriores. Provavelmente ao longo da história geológica do rio, este compartimento funcionou como zona de acúmulo de sedimentos aluviais provenientes de montante, provavelmente em decorrência de um relativo desconfinamento do canal e diminuição do gradiente/velocidade. Neste setor, o canal apresenta-se com um *padrão multicanal entrelaçado* (Figura 10) e desenvolve um modelo mais complexo que o anterior. Este compartimento é caracterizado por uma maior densidade de ilhas em relação ao compartimento anterior.

O Compartimento V se estende ao longo da planície flúvio-costeira desde o nodo de Penedo/Neópolis até a foz. A jusante deste ponto, o rio desenvolve uma planície aluvial encaixada sobre sedimentos litorâneos Pleistocênicos e Holocênicos. O canal se caracteriza por assumir um *padrão anastomosado* com grandes ilhas estáveis formadas por materiais finos (silte e argila) (Figura 23). As ilhas encontram-se estabilizadas por vegetação. Canais estreitos correm entre as ilhas, bem como “paranáis” (braços secundários sinuosos) são registrados.

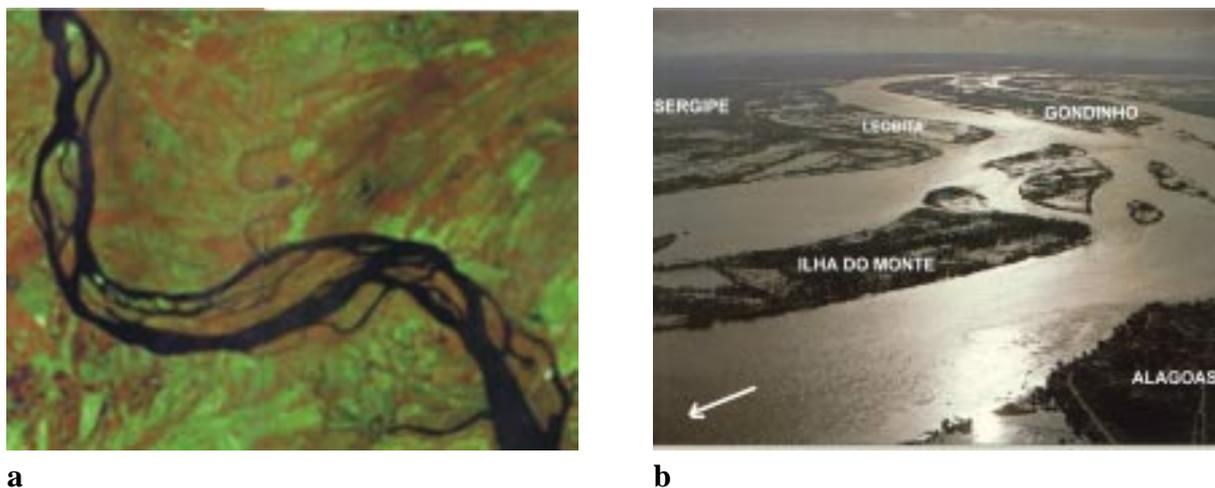


Figura 23. Compartimento Geomorfológico V: a) Imagem Landsat, ilhas estabilizadas e vegetadas; b) Padrão anastomosado visualizado por ocasião do período de inundação.

9.1 Modelo de propagação dos ajustes morfo-sedimentares complexos no período pós-barragens e de respostas diferenciadas de acordo com a compartimentação do sistema fluvial

O primeiro ponto a considerar nesta análise é que as respostas do canal ao impacto de 1ª ordem (retenção da carga sólida proveniente das porções da bacia rio acima) não é necessariamente uniforme em toda a extensão a jusante da barragem. O desencadeamento de processos erosivos e de assoreamento são evidências do complexo reajustamento da morfologia do canal em busca de se chegar a um novo equilíbrio dinâmico.

Uma conclusão relevante dos estudos de impactos produzidos pela cascata de grandes barragens construídas no leito do rio São Francisco, sobre o seu baixo curso, foz e zona costeira adjacente, é que eles ocorreram (e continuam ocorrendo) de forma encadeada e hierarquizada, como em outros casos nacionais e internacionais, mas demonstram a peculiaridade dos ajustes de propagarem de forma especializada e progressiva.

De acordo com diversos autores, a drástica diminuição da carga sólida, faz com que, para uma dada vazão, ocorra uma “sobra” de energia equivalente àquela que poderia estar sendo gasta no transporte das partículas. Esta parcela de energia é então utilizada pela corrente aquosa para escavar o seu próprio leito e, adicionalmente, erodir as suas margens. Inicia-se, desta forma, uma espécie de “autofagia”: o rio passa a arrancar os seus próprios sedimentos, depositados em épocas pretéritas (Figura 25).

No compartimento geomorfológico logo a jusante, entre Pão de Açúcar e Propriá (Compartimentos II e III), o vale se alarga, mas o rio continua encaixado em rochas metasedimentares e o relevo apresenta-se fortemente ondulado. É bem possível que em parte deste segmento possa estar ocorrendo entalhamento do leito, migração de formas de leito (barras de canal), associado à erosão das margens. No reconhecimento de campo foi constatada a existência de inúmeros focos erosivos nas margens da calha quando constituídas por sedimentos aluviais e nas margens de ilhas e barras emersas (Figura 26).

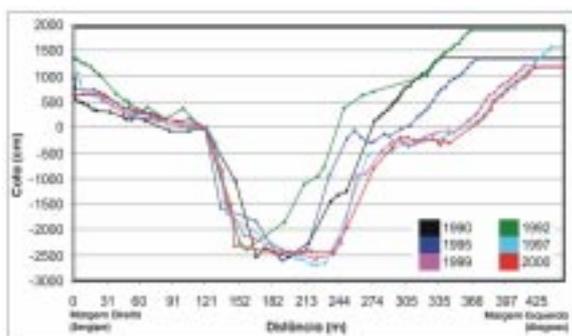


Figura 25. Superposição da seqüência histórica de perfis batimétricos transversais (1990-2000). Estação Fluviométrica de Piranhas. Fonte: ANEEL/ANA.

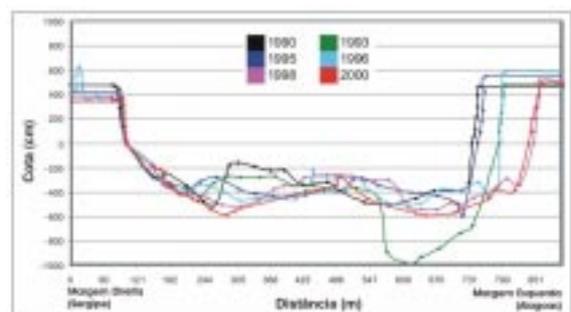


Figura 26. Perfis batimétricos transversais ao rio São Francisco, na Estação Fluviométrica de Propriá obtidos entre 1990 e 2000. Fonte: ANEEL/ANA.

Ainda seguindo o modelo teórico, é esperado que no compartimento seguinte (Compartimento III) venha a ser de acúmulo dos sedimentos retirados dos segmentos anteriores. Neste compartimento, compreendido entre Propriá e a Penedo, o rio corta rochas sedimentares da

Bacia Sedimentar Sergipe-Alagoas e sedimentos aluviais e litorâneos e o rio desenvolve uma planície de inundação mais ampla.

O padrão de geométrico de canal assumido pelo rio neste compartimento, é o *entrelaçado*, padrão compatível com estas condições hidrosedimentológicas, caracterizado por inúmeras barras arenosas emersas e submersas, geralmente posicionadas nas laterais do canal ou associadas às ilhas de constituição arenosa (nas porções montante ou jusante das mesmas), que provocam a subdivisão do canal.

O assoreamento verificado neste trecho pode, em parte, ajudar a explicar por que o mesmo é exatamente o mais atingido pela erosão marginal. Em canais fluviais, a diminuição da profundidade tende a ser acompanhada pelo aumento da largura do canal ou tendência a migração lateral do canal, que se traduz em erosão das margens, como formas de manter o equilíbrio dinâmico do sistema

No compartimento final (Compartimento IV), entre Ilha das Flores/Neópolis e a foz, o rio assume um padrão *anastomosado*, em que predominam amplamente as ilhas fixas e vegetadas. Geralmente estas ilhas se posicionam no meio da calha, dividindo o rio em dois canais principais, um na margem esquerda (alagoana) e outro na margem sergipana (direita), sendo este o mais proeminente. As barras arenosas geralmente são submersas e desenvolvem-se no leito destes canais.

9.2 Considerações sobre a evolução do sistema fluvial e estuarino e nova dinâmica fluvial pós-barragens no incremento da erosão marginal nos compartimentos III e IV

A reestruturação morfo-sedimentar do baixo São Francisco aconteceu como resposta às mudanças do nível do mar desde o holoceno médio.

O período pós Xingó tem se caracterizado por decrescimento da vazão efetiva do canal, portanto “stream power”, e estabilização do nível de água, fatos esses que estão levando a três respostas particulares: a) a metamorfose do sistema por fixação de barras fluviais pela vegetação, b) por processos erosivos laterais produzidos pelo canal ante esta nova situação hidrodinâmica e c) redistribuição da carga de fundo sob as novas condições (surgimento de barras arenosas dentro do canal) (Figura 27).

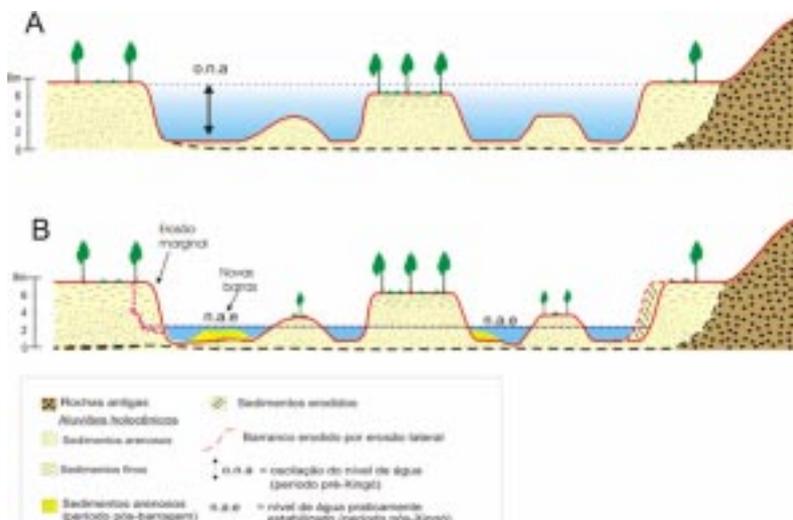


Figura 27. Modelo esquemático da morfodinâmica fluvial no período pré e pós-barragem de Xingó. A) período pré-Xingó. B) período pós-barragem.

O sistema está passando em uma fase de reajuste, em resposta às novas condições hidrossedimentológicas, em busca de um novo padrão eficiente enquanto a capacidade de transporte de sedimentos, como pode ser visto atualmente na redistribuição dos sedimentos arenosos e possivelmente, mas que deveria ser comprovada, ajuste na sinuosidade e amplitude de onda do talvegue.

É interessante notar que as maiores taxas de erosão marginal em áreas de baixa influência de maré precisamente se concentram no segmento IV, onde o rio possui uma relativamente bem desenvolvida planície aluvial produzida como resposta aos ajustes impulsionados pela transgressão do holoceno médio.

O mencionado demonstra a importância de se ter um esquema de evolução geral da planície aluvial e da arquitetura de seus depósitos. Os estudos de morfohidráulica que devem ser desenvolvidos como continuação deste projeto, deverão reforçar estes conhecimentos e a área a ser estudada deveria se estender pelo menos até a represa de Xingó. O fato de ter uma boa base cartográfica de ocorrência de processos erosivos e uma compartimentação geomorfológica do sistema é um grande ponto de partida para a realização de balanços mais detalhados, mas particularmente das respostas morfohidráulicas de cada segmento.

9.3 Encadeamento e hierarquia dos impactos geomorfológicos gerados pelas barragens no baixo São Francisco e análise comparativa com os estudos de casos internacionais

Foram identificadas para o baixo curso do rio São Francisco, quatro distintas ordens de hierarquias de causa e efeito relacionadas entre si, como consequência dos impactos hidro-geomorfológicos gerados pela barragem de Xingó, os quais incluem uma primeira aproximação do comportamento da dinâmica fluvial atual entre a barragem e a foz, nos cinco principais compartimentos definidos nos itens anteriores. Este modelo foi elaborado à partir das evidências geomorfológicas, sedimentológicas e hidrológicas (Figura 27).

HIERARQUIA, ENCADEAMENTO E INTER-RELAÇÕES ENTRE

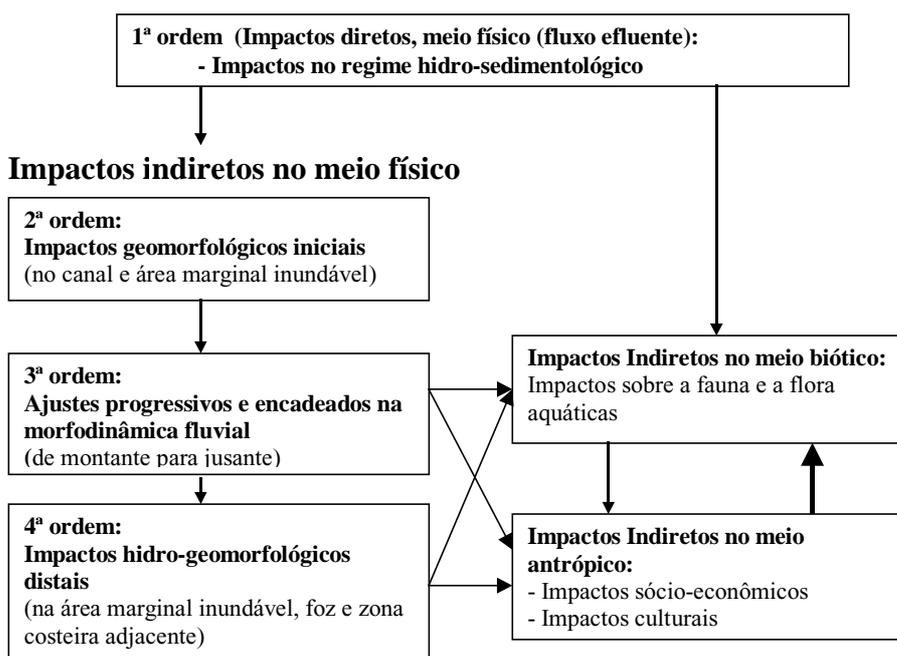


Figura 27.
Hierarquia, encadeamento e inter-relações entre os impactos.

Quadro 5 . Impactos hidro-geomorfológicos identificados à jusante de Xingó, de acordo com a ordem hierárquica.

IMPACTOS DE PRIMEIRA ORDEM (DIRETOS)

Alteração nas características e temporalidade do fluxo do rio

Alterações no regime hidrológico

- Controle das vazões líquidas: regularização do fluxo efluente
- Drástica alteração na sazonalidade: diminuição da intensidade e frequência das cheias

Alterações no regime sedimentológico

- Fluxo efluente da barragem/usina de Xingó praticamente desprovido de carga sólida (retenção da carga suspensa e de fundo)

Impactos nos meios biótico e biótico

IMPACTOS DE SEGUNDA ORDEM (INDIRETOS)

Aumento do poder erosivo do fluxo do canal

Entalhe do leito do rio

Descida do nível de base e do nível da água local

Extinção das Lagoas Marginais

Corte de suprimento de água e sedimentos para as várzeas e lagoas marginais

Impactos nos meios biótico e antrópico

IMPACTOS DE TERCEIRA ORDEM (INDIRETOS)

Alteração na atuação dos processos do canal

Disseminação e potencialização dos processos de erosão acelerada nas margens do rio

Processos de deposição no leito: rápida formação e migração de novas barras arenosas no canal (assoreamento)

Alterações na morfologia do canal

Mudanças no perfil longitudinal e no gradiente do rio (compartimentos I a IV)

Processos de deposição no leito e nas margens. Reajuste da morfologia do canal pela migração dos setores de erosão e sedimentação. O assoreamento do canal pode atingir longas distâncias

Mudanças no perfil transversal do rio

Alterações na morfologia do canal/Mudança na configuração do (vista em planta).

Propagação dos ajustes geomorfológicos de montante para jusante em decorrência do novo comportamento da morfodinâmica fluvial (Pós Barragens)

Ajustes progressivos e encadeados na morfodinâmica fluvial pela migração dos setores de erosão e sedimentação, obedecendo à compartimentação geomorfológica pretérita do rio

Impactos nos meios biótico e antrópico

IMPACTOS DE QUARTA ORDEM (INDIRETOS)

Variações no nível piezométrico nas áreas marginais ao canal

- Redução da amplitude do nível do lençol freático próximo ao canal, em função do controle da vazão (ausência das cheias)
- Rebaixamento do lençol freático (em relação ao antigo período do ano sob efeito das enchentes)

Modificações na dinâmica da foz

- Drástica diminuição do aporte de sedimentos à foz (descarga sólida)
- Menor taxa de reposição do sedimentos praias erodidos pelas ondas
- Recuo da linha de praia por erosão

Possível intrusão de cunha salina: de acordo com dados obtidos pelo GEF São Francisco/UFAL as vazões que vem sendo liberadas pela UHE Xingó tem sido suficientes para impedir a entrada da água salina (marinha) no rio.

Impactos nos meios bióticos e antrópicos

Dessa forma, a principal mudança de primeira ordem refere-se à alteração nos regimes hidrológico e sedimentológico. Na segunda categoria de efeitos, resultante da primeira ordem, destaca-se um conjunto que relaciona o aumento do poder erosivo do fluxo do canal, o entalhe do leito do rio e a descida do nível de base. A terceira ordem de efeitos engloba as mudanças no perfil longitudinal e no gradiente do rio; os processos de erosão nas margens e as mudanças no perfil transversal. Na quarta categoria estão incluídas as respostas dos tributários, as variações no nível piezométrico e as modificações na dinâmica da foz.

9.4 Cenário teórico para a evolução dos impactos na faixa costeira adjacente à foz

A partir da análise dos estudos de casos internacionais e das condições específicas da dinâmica costeira da região da foz do rio São Francisco, é razoável prever que a partir de um certo tempo (não estimado) é possível ocorrer uma redução ainda maior no aporte descarga sólida à foz, na medida em que o rio atingir uma nova condição de equilíbrio.

Assim, haveria uma tendência ao aumento da erosão nas praias a sul da desembocadura. O que poderia ser apenas o início de um processo mais amplo, onde a erosão tende a se propagar, atingindo uma extensão considerável de praias no litoral norte de Sergipe, eventualmente distantes muitos quilômetros da foz do rio São Francisco.

Também as águas do litoral sergipano, tradicionalmente menos límpidas do que as dos litorais alagoano e baiano, pela presença de sedimentos em suspensão, na sua maior parte tendo por fonte o rio São Francisco, possivelmente tenderão a se apresentar cada vez mais transparentes, em consequência do menor aporte de sedimentos finos e com diminuição dos teores de nutrientes para a fauna aquática.

Caso o quadro ambiental evolua neste sentido, os prejuízos e os impactos sobre os ecossistemas (inclusive manguezais desenvolvidos nos estuários do litoral norte sergipano) e as atividades socioeconômicas do Estado de Sergipe e esta porção do Atlântico Sul serão relevantes, afetando a pesca, o turismo e as construções civis na faixa de praia.

10. CONCLUSÕES

Quanto a evolução histórica da erosão marginal no trecho do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba

· O acompanhamento histórico das mudanças morfodinâmicas no trecho do rio São Francisco onde se situa o Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, demonstrou que ocorreu uma inversão do processo geológico dominante na margem direita no início da década de 70. Até a década de 60 predominava a sedimentação, mas já no início da década de 70 o local passou a ser palco da atuação de processos erosivos, porém de forma não contínua, uma vez foi intercalado por períodos de assoreamento após as cheias. Concomitantemente, ocorreu a mudança na trajetória do talvegue principal, da margem esquerda para a direita.

· Assim, o início do fenômeno erosivo no trecho de margem correspondente ao Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba é anterior à implantação do Perímetro Irrigado e da construção da barragem de Sobradinho. Entretanto, ficou evidenciado que o processo erosivo na margem direita tornou-se acentuado à partir do início da década de 80, período imediatamente posterior à entrada em operação da usina hidrelétrica de Sobradinho, tornando-se mais agressivo no final da década de 90,.

· As soluções de engenharia civil empregadas pela CODEVASF para conter o avanço da erosão - adotadas sempre em caráter emergencial e com alto custo - falharam parcialmente, provavelmente devido à falta de estudos prévios que objetivassem a compreensão do comportamento da dinâmica fluvial e ao conhecimento dos fatores e processos envolvidos, agravados pela ausência de dados precisos de monitoramento hidrosedimentológico e geomorfológico. A conclusão é que a solução adotada – colocação de enrocamentos na base dos barrancos – não é eficiente para conter a erosão marginal por não considerar todos os processos envolvidos e restringir a solução apenas à margem si, sem considerar a dinâmica fluvial e a dinâmica estuarina.

Quanto a distribuição espacial dos focos de erosão marginal ativa e suas características morfológicas e litológicas

· Foram identificados 57 focos de erosão marginal fluvial entre Propriá e a foz do rio São Francisco. Na margem direita do rio (Sergipe), o somatório dos comprimentos dos trechos sob erosão resulta em uma extensão total de 29,90 quilômetros, o que significa 39,90 % do comprimento da linha de margem. Na margem alagoana, a erosão marginal atinge uma menor extensão, da ordem de 17,80 quilômetros, o que corresponde a 22,50% da linha de margem. Em termos absolutos, a erosão na margem direita excede a da esquerda em 12,1 km, o que representa uma diferença de 68% entre ambas.

· Margens altas quando comparadas às margens médias e baixas, e estando submetidas às mesmas forças, fatores e processos, apresentam uma maior taxa efetiva de recuo. Isto porque a altura favorece o desencadeamento e a frequência de movimentos de massa controlados pela ação gravitacional.

· A litologia e a granulometria do material constituinte das margens exercem um papel importante no seu grau de estabilidade e funcionam como fator facilitador ou inibidor ao avanço da erosão marginal. A resistência da margem à erosão está diretamente relacionada às suas características litológicas.

· As margens formadas essencialmente por sedimentos coesivos, argilosos, são os mais resistentes a erosão. Entretanto, quando sofrem solapamento na base e/ou ficam saturados, ocorrem com frequência movimentos de massa, como queda de blocos e deslizamentos. A ação erosiva sobre estas margens, portanto, só é efetiva quando sofrem a ação corrosiva da corrente fluvial (que provoca solapamento na base) ou o embate direto das ondas nas subidas das marés. As margens coesivas estão distribuídas espacialmente apenas nas proximidades da foz.

· Margens formadas essencialmente por sedimentos não coesivos (arenosos), são altamente susceptíveis à erosão, a depender da associação com outros fatores e processos erosivos. Em termos de distribuição espacial, este tipo de margem ocorre em todo o trecho estudado, mas com maior concentração no segmento IV, entre Cotinguiba-Pindoba e Cajaiba.

Quanto a ação conjunta dos processos erosivos, à dinâmica e a evolução dos processos erosivos marginais

· A erosão das margens do baixo curso do rio São Francisco, aparentemente um fenômeno simples, demonstrou ser resultado da atuação de um complexo de fatores e processos, alguns relacionados a causas imediatas e outros a causas distantes, tanto espaciais como temporalmente, relacionadas à dinâmica do sistema fluvial e às intervenções provocadas pelas barragens.

· Os processos erosivos devem-se a conjugação de fatores relacionados à dinâmica fluvial, à dinâmica estuarina e as oscilações artificiais do nível do rio promovido pela operação das barragens, ocorrendo tanto no intervalo de flutuação do nível do rio, como de forma subaquosa relacionada a corrente fluvial no canal principal.

· Na maior parte dos trechos de margens sob erosão, é difícil dissociar a ação das ondas, da ação das marés (ambas relacionadas com a oscilação do nível do rio) e da ação direta da corrente fluvial, na medida em que estes processos atuam concomitantemente e/ou de forma complementar e o produto resultante é o mesmo, isto é, a erosão e, portanto, o recuo das linhas de margens.

· Apesar desta dificuldade, a análise dos fatores e processos intervenientes, permitiu evidenciar que três conjuntos distintos de processos promovem a erosão nas margens, cada um deles atuando em diferentes posições em relação à superfície da água do rio: a) relacionados à hidrodinâmica do canal, b) relacionados à dinâmica do estuário e as oscilações artificiais do nível do rio e c) relacionados ao comportamento geotécnico do barranco (talude marginal). Eles atuam respectivamente em três posições, em relação à superfície da água: abaixo do nível do rio (subaquoso), ao nível do rio e acima deste (subaéreo).

· A atuação associada destes três conjuntos de processos é a responsável pelas taxas de erosão mais efetivas, se as demais condições de suscetibilidade à erosão forem atendidas. O caso típico é o trecho da margem direita situado no Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, onde se atinge a máxima eficiência do processo e velocidade de recuo das margens por erosão devido a uma coincidência de fatores predisponentes.

· Este modelo não se aplica no caso das margens do Tipo A (Pontal da Barra) e B (Saramen), pois a erosão nestes casos não está associada a ação da corrente fluvial (sub aquosa). Ela ocorre no nível de intermarés, e apenas por ocasião das marés excepcionalmente altas, pela ação direta das ondas.

- Os conjuntos de processos erosivos resultantes da ação da água (na zona de intermarés e subaquosos) estão diretamente condicionados ou à dinâmica fluvial ou à dinâmica estuarina. A primeira atua no sentido montante-jusante e a segunda no sentido inverso, isto é, de jusante (foz/oceano) para montante.
- Dois padrões de margens (margens sob erosão contínua e margens sujeitas apenas a erosão episódica) foram identificadas em relação a forma de atuação temporal dos processos dominantes e que estão intimamente relacionados às dinâmicas ambientais que os promovem, respectivamente, a dinâmica fluvial e a estuarina.

Quanto aos fatores e processos relacionados à corrente fluvial que participam da erosão marginal

- No baixo curso do rio São Francisco a ocorrência de focos de erosão marginal está intimamente relacionada com a proximidade do talvegue à margem. A trajetória do talvegue não necessariamente obedece ao traçado externo da calha fluvial e suas curvas nem sempre coincidem com as curvas externas do rio.
- Quanto ao papel exercido pela ação da corrente fluvial na evolução da erosão das margens pode-se concluir que o contínuo trabalho de remoção subaquosa das partículas pela corrente principal, cuja trajetória coincide com o talvegue, é, em última instância, o grande responsável pelo recuo das linhas de margem. Sem esta remoção não haveria continuidade do processo, pois a tendência seria do barranco atingir um perfil de equilíbrio, estabilizando a margem.
- Esta conclusão reforça a avaliação do papel exercido pela regularização do rio na potencialização da erosão marginal, ao favorecer a permanência do talvegue em uma mesma posição durante vários anos seguidos.
- O material removido é, em parte, redepositado imediatamente a jusante, promovendo o acúmulo de sedimentos arenosos no leito do canal, formando novos bancos arenosos submersos. A formação e contínua migração de novos bancos/barras arenosas submersas ocupando muitas vezes a maior parte do canal provoca problemas de segurança e transtornos à navegação fluvial.

Quanto aos fatores ligados a dinâmica estuarina e ao papel exercido pela flutuação do nível do rio e dos movimentos gravitacionais na evolução do ciclo erosivo das margens

- O nível do rio São Francisco é afetado diariamente pelas marés oceânicas, na medida em que a subida do nível do mar provoca o barramento natural do fluxo do rio. A elevação e abaixamento do nível da água doce do rio, em dois ciclos diários de maré alta e baixa, exercem um papel importante na promoção da erosão marginal fluvial. Como o nível do rio permanece mais ou menos constante (regularizado) durante todo o ano, ocorre uma potencializando da ação da maré sobre a margem.
- A flutuação cotidiana do nível do rio tem também uma origem artificial. Os dados analisados mostram que as vazões do rio São Francisco, principalmente no trecho entre Xingó e Propriá, são fortemente influenciados pelas regras de operação da Usina de Xingó e resultam em oscilações diárias e semanais os níveis d'água do rio São Francisco com amplitudes que variam entre 20 e 60 centímetros.

· No dia-a-dia, a flutuação do nível do rio (natural ou artificial) e as ondas associadas desempenham um papel importante na manutenção do ciclo evolutivo da erosão marginal. A ação das ondas promove inicialmente o solapamento da base do barranco. Em função da condição de instabilidade criada, movimentos de massa ocorrem com certa frequência. O material movimentado acumula-se na base do barranco onde fica sujeito saturação dos poros pela água devido à subida do nível do rio e passa a sofrer a ação erosiva direta das ondas. Ao cair na zona da ação das ondas, o material será removido da base do barranco e transportado por correntes secundárias para a corrente principal do canal fluvial.

· As variações excepcionais nas amplitudes das marés causadas por eventos episódicos potencializam os efeitos erosivos das marés nas margens fluviais situadas nas proximidades da foz e atingem algumas margens não submetidas à erosão do dia-a-dia.

· A remoção do material que se acumula na base das margens pelas ondas tem, além da sua ação erosiva direta, uma consequência indireta, fundamental para manter a continuidade do processo evolutivo de recuo das margens: evita assim que a margem venha a atingir o seu perfil de equilíbrio. Se tal acontecesse, poderia levar a interrupção do processo de recuo da margem, até que outro agente (no caso, o fluxo do canal) provocasse o reinício do ciclo erosivo.

· No do rio entre Pão de Açúcar e Propriá, a oscilação diária artificial do nível do rio é a principal responsável pela erosão marginal, ao provocar a elevação do nível do lençol freático, que associada à ação das ondas, promove a remoção das partículas arenosas constituintes da base das margens sedimentares.

Quanto à forma como a regularização das vazões promovidas pelas grandes barragens influenciam na erosão marginal

· A longa duração da vazão média regularizada pela operação das barragens implica na permanência do nível do rio em um determinado patamar durante um período muito longo, em níveis médios relativamente elevados em relação às suas condições anteriores, o que contribui para a desestabilização das margens constituídas por sedimentos fluviais ou litorâneos.

· Além disso, a permanência da incidência da linha de fluxo principal sobre um determinado trecho da margem submetida à erosão e o conseqüente somatório das taxas de recuo da margem ao longo dos anos, pode resultar em um valor mais expressivo do que seria de se esperar em um quadro natural. Este fenômeno foi particularmente observado na faixa correspondente ao Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.

· Este contexto não se aplica a todas as situações. Por vezes ocorre exatamente o oposto: em alguns trechos do rio foram identificadas pequenas mudanças atuais nos trajetos dos talwegues como consequência da migração recente de barras arenosas subaquosas provocada pela remobilização dos sedimentos do canal e dos materiais retirados das margens pela erosão. Isto significa que as mudanças nas posições do talvegue continuam a ocorrer, embora em um ritmo menor, impulsionadas não pelas grandes vazões, mas por uma vazão efetiva que possibilita o transporte de carga de fundo (areias) ao diminuir a área útil do canal e forçar a sua migração lateral, o que se configura sob a forma de erosão marginal fluvial.

Quanto a alteração na sazonalidade natural do rio promovida pelas grandes barragens e as conseqüências para a erosão marginal

· A análise das séries históricas de vazões permitiu identificar que as variações interanuais e sua sazonalidade no baixo curso do rio São Francisco apresenta quatro fases distintas de comportamento do regime hidrológico. A primeira fase corresponde ao regime natural e as fases seguintes foram atribuídas às influências das sucessivas construções de barragens rio acima. Estas alterações no regime hidrológico do rio não tinham sido claramente estabelecidas nos trabalhos anteriores, uma vez que os dados eram tratados como uma série histórica contínua, o que mascarava a influência de cada período identificado.

· No período imediatamente posterior à construção da barragem de Sobradinho (1978-1987) ocorreu uma elevação das vazões mínimas, mas permaneceram os fortes picos anuais de vazão característicos do verão. Apesar de grande capacidade de regularização de Sobradinho, as cheias, embora parcialmente atenuadas, continuaram a ocorrer anualmente, como no regime natural.

· A freqüência das enchentes no Baixo São Francisco só foram substancialmente reduzidas após 1987-1888, época que coincidente com a construção da barragem de Itaparica. A barragem Itaparica apesar de possuir apenas uma pequena capacidade de regularização desempenha um papel importante na retenção das vazões produzidas no submédio São Francisco, abaixo de Sobradinho. Estas contribuições eram, ciclicamente, as responsáveis pela potencialização de cheias no baixo São Francisco.

· O período pós-construção de Xingó (1994-2001) foi marcado pela total ausência de cheias ou mesmo de picos de vazões elevadas. Este fato levou à falsa conclusão por parte de diversos técnicos e da população ribeirinha, de que cheias não mais ocorrerão no baixo São Francisco, devido ao controle das vazões devido à construção da barragem de Xingó. De fato, existe uma coincidência temporal entre os dois fatos, mas Xingó não é responsável, pela contenção de eventuais cheias, por ser uma barragem que trabalha a fio-d'água. A depender do aporte de água à Sobradinho e a Itaparica, as enchentes poderão voltar a ocorrer no baixo São Francisco.

Quanto à retenção dos sedimentos nas barragens e as alterações no transporte sedimentar à jusante

· Entre os diversos impactos resultantes da construção dos grandes barramentos rio acima, a retenção nos reservatórios de grande parte dos sedimentos provenientes de montante, ao modificar substancialmente as características dos fluxos efluentes da barragem de Xingó é a que mais interfere na dinâmica do segmento do rio situado a jusante da barragem. A barragem de Xingó representa o elo final da cadeia de retenção de sedimentos provenientes de montante. Rio abaixo de Xingó a água é excessivamente límpida e a carga sólida total atualmente transportada representa apenas cerca de 4 % dos valores existentes antes da implantação das barragens rio acima.

· Eventualmente pode ocorrer uma mudança temporária neste quadro: a ocorrência de episódios de altas vazões por ocasião de chuvas excepcionais no alto, médio ou submédio São Francisco, pode implicar em uma drástica diminuição do tempo normal de permanência da água nos reservatórios, fazendo com que nos fluxos efluentes das barragens se elevem substancialmente os valores da carga suspensa transportada.

· Na medida em que as partículas sólidas ficam quase que totalmente retidas nos reservatórios rio acima, a atual carga sedimentar transportada pelo rio deve-se a uma produção (pequena quando comparada aos valores naturais) originada dentro do próprio canal: o material retirado pela erosão das margens, da erosão do próprio leito do rio e, em escala muito pequena, da contribuição das sub-bacias afluentes. A erosão marginal e do leito do canal contribuem para o processo de assoreamento localizado do canal, o que, em alguns trechos do rio, leva à realimentação do processo erosivo das margens.

Quanto ao novo comportamento da dinâmica fluvial e as formas de propagação dos ajustes morfodinâmicos nos diversos compartimentos do canal, em resposta às mudanças do regime hidro-sedimentológico impostas pelas barragens

· Para se estabelecer uma compreensão adequada do comportamento do sistema fluvial perante as mudanças hidrosedimentológicas impostas à jusante das grandes barragens, se fez necessária uma análise abrangente, tanto do ponto de vista espacial como temporal. Concluiu-se que as respostas morfo-dinâmicas às estas mudanças dependem dos condicionantes morfo-estruturais e da história geológica que condicionou a evolução do sistema fluvial e do sistema litorâneo adjacente.

· Concluiu-se que o baixo do rio São Francisco à jusante de Xingó caracteriza-se por uma evolução controlada por uma compartimentação morfo-sedimentar, podendo ser dividido em 5 compartimentos geomorfológicos, definidos por controles litológicos, topográficos e estruturais que provavelmente controlaram a evolução do sistema fluvial. De montante para jusante, o padrão de canal passa sucessivamente de um canal único encaixado no relevo (canyon) em compartimentos (I e II) que tem atuado fundamentalmente como corredor de sedimentos não se registrando feições deposicionais fluviais de importância, para um padrão de canal ligeiramente sinuoso e com baixo coeficiente de entrelaçamento entre ilhas e barras arenosas e apresentando uma planície aluvial pouco desenvolvida (Compartimento III).

· No compartimento IV apresenta-se menos encaixado, com uma planície aluvial bem mais larga e desenvolve um modelo mais complexo, com um *padrão multicanal entrelaçado*. A maior densidade de ilhas e barras arenosas emersas e submersas indica provavelmente que, ao longo da história geológica do rio, este compartimento funcionou como zona de acúmulo de sedimentos aluviais provenientes de montante. No compartimento final (V) o canal se caracteriza por assumir um *padrão anastomosado* em que os canais são mais profundos e predominam amplamente as grandes ilhas fixas formadas por materiais finos (silte e argila) e estabilizadas pela vegetação.

· Os estudos permitiram concluir que o rio não respondeu de forma linear às mudanças no regime hidro-sedimentológico. As respostas do canal ao impacto de 1ª ordem representado pela diminuição no aporte de carga sólida (que fica retida nos reservatórios) não é uniforme em toda a extensão a jusante da barragem de Xingó. Este trecho está sendo submetido a reajustamentos morfo-hidráulicos e sedimentares complexos que avançam progressivamente e de forma encadeada, de montante para jusante, até a foz.

As formas de propagação dos ajustes variam de acordo com os Compartimentos Geomorfológicos do baixo curso do rio São Francisco. Os cinco compartimentos permitiram ao rio, após as sucessivas construções de barragens, em especial, após a construção da barragem de Xingó, efetuar o início de um ajuste diferenciado.

· O desencadeamento de processos erosivos e de assoreamento ao longo estirão do rio situado à jusante da barragem de Xingó são evidências do complexo reajustamento da morfologia do canal em busca de um novo equilíbrio dinâmico. Estas respostas morfo-sedimentares devem ser entendidas em um contexto espacial desde o trecho logo a jusante da barragem até a foz do rio São Francisco. Em relação a problemática da erosão marginal, o fato relevante demonstrado é que as erosões marginais atuais se inserem no contexto dos ajustes pela qual está passando a dinâmica fluvial. Portanto, não se deve tratar o problema como de ordem apenas local, mas dentro de um contexto mais amplo, inserido em um quadro de grandes mudanças na morfodinâmica do rio.

· O compartimento I responde de acordo com o modelo disponível na literatura internacional sobre impactos de barragens. O comportamento típico do segmento do canal logo a jusante da barragem, à partir da drástica diminuição da carga sólida é o entalhamento do leito. Comprovou-se, através de análise da série histórica de perfis batimétricos, o aprofundamento e alargamento do vale neste compartimento, com a erosão do leito móvel do rio e provavelmente a exposição do substrato duro rochoso.

· Nos compartimentos geomorfológicos logo a jusante, entre Pão de Açúcar e Propriá (Compartimentos II e III), esta ocorrendo entalhamento do leito e migração de formas de leito (barras de canal), associada à erosão das margens. No reconhecimento de campo foi constatada a existência de inúmeros focos erosivos nas margens da calha quando constituídas por sedimentos aluviais e nas margens de ilhas e barras emersas.

· No compartimento seguinte (Compartimento IV), entre Propriá e Penedo, está ocorrendo de acúmulo dos sedimentos retirados dos segmentos anteriores. O assoreamento verificado neste trecho pode, em parte, ajudar a explicar por que o mesmo é exatamente o mais atingido pela erosão marginal. Em canais fluviais, a diminuição da profundidade tende a ser acompanhada pelo aumento da largura do canal ou tendência a migração lateral do canal, que se traduz em erosão das margens, como formas de manter o equilíbrio dinâmico do sistema.

· No compartimento final (Compartimento IV), entre Ilha das Flores/Neópolis e a foz, aparentemente é o setor do rio menos atingido pelo processo de ajuste. Comparado ao compartimento geomorfológico anterior, a erosão é menos acentuada e mais localizada. As feições morfológicas diferenciadas que ocorrem neste compartimento poderão vir a se modificar, em virtude da migração dos setores de erosão e sedimentação, na direção de jusante, uma vez que, com o passar do tempo, o assoreamento do canal poderá ultrapassar os limites entre os compartimentos IV e V.

Neste caso, mudanças na morfodinâmica poderão ser expressivas, levando à semelhança do compartimento IV, à acentuação do processo erosivo marginal e assoreamento progressivo de montante para jusante. Tais mudanças certamente se refletiriam na biota e nos usos do rio pelo homem (pesca, turismo e navegação).

· A compreensão de que os reajustamentos em curso obedecem a condicionamentos morfo-estruturais poderá vir a ser utilizado no direcionamento de futuros monitoramentos, intervenções, manejo do ecossistema fluvial e previsão de evolução das mudanças hidroambientais.

Quanto as causas, ao encadeamento e hierarquia dos impactos geomorfológicos gerados pelas barragens e análise comparativa com os estudos de casos internacionais

· Os estudos confirmaram que o baixo curso do rio São Francisco vem sofrendo uma série de ajustes morfo-hidráulicos como resposta aos impactos diretos promovidos pelas grandes barragens. Estes ajustes avançam progressivamente e de maneira encadeada, de montante para jusante, e as suas formas de propagação ocorrem de maneira diferenciada em cada um dos cinco compartimentos geomorfológicos controladores da evolução do baixo curso do rio São Francisco.

· Foram identificadas para o baixo curso do rio São Francisco, quatro distintas ordens de hierarquias de causa e efeito relacionadas entre si, como conseqüência dos impactos hidro-geomorfológicos gerados pela barragem de Xingó, os quais incluem uma primeira aproximação do comportamento da dinâmica fluvial atual entre a barragem e a foz, nos cinco principais compartimentos definidos nos itens anteriores.

· Dessa forma, as mudanças de primeira ordem (*impactos no regime hidro-sedimentológico*) são seguida por uma segunda categoria de efeitos (*impactos geomorfológicos iniciais*), a qual atinge tanto a área marginal inundável quanto o canal fluvial, onde ocorre o aumento do poder erosivo do fluxo, resultando inicialmente no entalhe do leito do rio. A terceira ordem de efeitos (*ajustes progressivos e encadeados na morfodinâmica fluvial*) engloba as mudanças dos setores de erosão (entalhe e erosão das margens) e sedimentação ao longo dos compartimentos geomorfológicos fluviais. Na quarta categoria (*impactos hidro-geomorfológicos distais*) estão incluídas as respostas dos tributários, as variações no nível piezométrico e as modificações na dinâmica da foz.

· A análise comparativa com os estudos de casos internacionais, demonstrou que as alterações hidro-geomorfológicas no baixo curso do rio São Francisco correspondem, em linhas gerais, efeitos potenciais esperados, de acordo com o observado em outros rios submetidos ao controle de barragens. Mas apresentam certas peculiaridades, em função da constituição litológica do fundo e das margens, da interação com a dinâmica costeira e dos controles morfo-estruturais configurados através dos compartimentos geomorfológicos. Além disso, chamam a atenção pela rapidez (poucos anos) em que as respostas morfo-dinâmicas se manifestaram, pela sua magnitude, amplitude e ampla distribuição espacial e pela gravidade dos problemas hidro-ambientais e sócio-econômicos-culturais gerados ao longo de todo o sistema fluvial à jusante da barragem (até a foz, distante 256 Km do corpo da barragem) e zona costeira adjacente.

· Por outro lado, ficou demonstrado que tal quadro de degradação ambiental já era previsível à partir do conhecimento internacional disponível à época da construção da barragem de Xingó. Entretanto, estas considerações não constaram dos estudos de impactos ambientais da UHE Xingó e tampouco dos programas de monitoramento ambiental subseqüentes, acordados entre a CHESF e o IBAMA. Estes monitoramentos ficaram limitados até alguns poucos quilômetros a jusante do corpo da barragem de Xingó, onde o rio encontra-se relativamente estável e encaixado em rochas duras, ao passo que, as grandes modificações hidro-ambientais começam a se tornarem mais evidentes em distâncias superiores a 100 km deste local. Ao que se apurou, as autoridades estaduais e municipais e a população ribeirinha não foram suficientemente esclarecidas destas conseqüências, resultantes do “confisco” da carga sólida e dos nutrientes e das mudanças no regime hidrológico e, nem tampouco, foram estabelecidas medidas compensatórias e mitigadoras para os impactos nos ecossistemas fluvial e litorâneo e meio antrópico.

· A conclusão geral a que se chegou quanto às causas primárias levaram à deflagração da atual fase de erosão marginal acelerada, foi a de que as grandes barragens, na medida em que estabeleceram um novo regime hidrosedimentológico e induziram um novo comportamento morfodinâmico para o rio, podem ser consideradas como as principais responsáveis pela promoção da disseminação de focos erosivos e o incremento da taxa de recuo das margens fluviais.

· O entendimento de que o sistema fluvial está passando por uma fase de reajuste, que possivelmente resultará no estabelecimento de um novo equilíbrio dinâmico com as novas condições decorrentes da construção e operação das grandes barragens, ressalta a importância em se estabelecer mecanismos permanentes de monitoramento da evolução dos sistemas ambientais, inclusive como forma de possibilitar a predição de cenários futuros, permitindo a formulação de propostas de ações mitigadoras, bem como a mensuração dos efeitos das eventuais ações de revitalização hidro-ambientais.

Quanto ao cenário teórico para a evolução dos impactos na faixa costeira adjacente à foz

· A partir da análise dos estudos de casos internacionais e das condições específicas da dinâmica costeira da região da foz do rio São Francisco, é razoável prever que a partir de um certo tempo (não estimado) é possível ocorrer uma redução ainda maior no aporte descarga sólida à foz, na medida em que o rio atingir uma nova condição de equilíbrio dinâmico. Estima-se que a partir deste momento provavelmente ocorrerá um agravamento do desequilíbrio entre a ação das águas do rio e ação das águas do oceano.

· Assim, haveria uma tendência ao aumento da erosão nas praias a sul da desembocadura. O que poderia ser apenas o início de um processo mais amplo, onde a erosão tende a se propagar, atingindo uma extensão considerável de praias no litoral norte de Sergipe, eventualmente distantes muitos quilômetros da foz do rio São Francisco.

· Na dinâmica geológica recente da zona costeira adjacente à foz é de se supor que os episódios de erosão acentuada das praias poderiam ser posteriormente ser compensados com novos aportes de sedimentos, em parte advindos do rio São Francisco, ocasião em que as faixas de praias voltavam a se recuperar. Com a drástica diminuição da contribuição fluvial à zona costeira, visualiza-se o risco das perdas de áreas costeiras, por erosão, se tornarem irreversíveis nas condições ambientais atuais.

· Caso o quadro ambiental evolua neste sentido, os prejuízos e os impactos sobre os ecossistemas (inclusive manguezais desenvolvidos nos estuários do litoral norte sergipano) e as atividades socioeconômicas do Estado de Sergipe e esta porção do Atlântico Sul serão relevantes, afetando a pesca, o turismo e as construções civis na faixa de praia.

· Estes possíveis impactos poderão ampliar a gravidade e a abrangência geográfica dos problemas ambientais enfrentados pela região, em decorrência das mudanças impostas ao rio São Francisco pela construção e operação das grandes barragens. Neste sentido, a região está a exigir um monitoramento contínuo e pormenorizado, de fundamental importância para a proposição de medidas para atenuar essas modificações.

11. RECOMENDAÇÕES

Considerando as conclusões obtidas nesse estudo, foram elaboradas 4 recomendações visando o conhecimento mais detalhado dos problemas identificados:

Título	Prazo (meses)	GEF US\$	Contrapartida US\$	Custo Total US\$
• Implantação uma rede de pesquisas e monitoramento hidroambiental permanente do rio e da sua foz	24	170.000	360.000	530.000
• Monitoramento da evolução do modelo de espacialização dos ajustes morfodinâmicos do baixo curso do rio São Francisco	24	150.000	300.000	450.000
• Estudo de soluções e elaboração de projeto executivo para a contenção da erosão nas margens dos perímetros irrigados no baixo curso do rio São Francisco, incluindo execução em área teste	24	100.000	200.000	300.000
• Evolução geomorfológica do Baixo São Francisco durante o holoceno e as possíveis implicações ambientais na zona costeira como resultado da interação com a dinâmica fluvial pós-barragens.	24	100.000	200.000	300.000

11.1. Recomendações quanto ao monitoramento ambiental múltiplo do rio e articulação interinstitucional: IMPLANTAÇÃO UMA REDE DE PESQUISAS E MONITORAMENTO HIDROAMBIENTAL PERMANENTE DO RIO E DA SUA FOZ

Conhecimento do problema e justificativa do trabalho

Nos últimos anos, o agravamento dos problemas ambientais e socioeconômicos na região do baixo São Francisco tem suscitado a execução de inúmeras pesquisas e planejamentos. Apesar do número relativamente elevado de trabalhos produzidos, poucos têm contribuído para a transformação da realidade ambiental e sócio-ambiental.

Uma das razões alegadas para a baixa efetividade dos inúmeros planos, programas e projetos têm sido a ausência de uma ação coordenada que permita a redução dos esforços dispersos, superposição de trabalhos e conseqüente desperdício dos recursos.

No que se refere especificamente às pesquisas no rio São Francisco, sua área marginal inundável, afluentes e zona costeira adjacente, a falta de articulação entre as instituições e grupos de pesquisas que atuam na região tem contribuído também para uma produção voltada principalmente para a coleta de dados, mas sem um compromisso com a busca de respostas aos problemas hidroambientais relevantes que se apresentam para a região e seus habitantes.

Os estudos do GEF/UFAL/UFS indicam para a necessidade de um novo direcionamento nas estratégias e nos tipos de dados a serem coletados, considerando-se os novos interesses de ampliação do conhecimento do comportamento das variáveis hidroambientais, hidrossedimentológicas, geomorfológicas, químicas, nutrientes e fauna aquática, com vistas a atender os usos múltiplos das águas e o conhecimento sobre os impactos produzidos pela construção e operação das grandes barragens sobre o baixo curso do rio São Francisco, sua foz e zona costeira adjacente.

A constatação de que o sistema fluvial está em processo de reajustamento em resposta às mudanças produzidas pelas barragens e de que este é um processo de longo prazo, leva a concluir que o levantamento realizado pelo Projeto GEF São Francisco registra apenas um estágio do mesmo, não sendo suficiente para realizar previsões razoavelmente seguras quanto à evolução do quadro hidroambiental e cenários futuros, necessárias para embasar propostas de medidas mitigadoras e de gestão ambiental.

A necessidade de um monitoramento contínuo, de forma a acompanhar a evolução da dinâmica do sistema fluvial e dos ecossistemas associados, única forma de garantir intervenções seguras e balizamento das medidas mitigadoras. Os levantamentos isolados e parciais não são suficientes para permitir a proposição de medidas de gerenciamento e mitigadoras, de forma a estabelecer uma nova base de convivência ecológica e sócio-ambiental com a situação de rio artificializado e regularizado pelas grandes barragens.

Ações

Desta forma, recomenda-se o estabelecimento de um sistema de monitoramento permanente do rio São Francisco e áreas marginais inundáveis, seus afluentes, sua foz e zona costeira adjacente, utilizando-se da base existente nas instituições regionais, em particular, as Universidades Federais, Órgãos de Gestão Ambiental e de Recursos Hídricos, ONGs e o Instituto Xingó nos Estados de Sergipe e Alagoas, envolvendo parcerias com instituições e grupos de pesquisas de outros Estados.

O arranjo interinstitucional a ser proposto deverá ser fruto de uma ampla negociação no sentido de potencializar a atuação conjunta das instituições já atuantes na região, com o aproveitamento da infra-estrutura já existente, inclusive laboratórios, dos programas em desenvolvimento e dos grupos de pesquisas atuantes na região, minimizando a estrutura física e evitando a alocação de recursos materiais e humanos em uma única instituição.

O fortalecimento e a viabilização de grupos de pesquisas locais focados nos problemas hidroambientais e ecológicos da região, através da criação da rede de pesquisa pode possibilitar o desenvolvimento de um espaço para entendimento e integração que venha a resultar na reorientação nas atitudes de pesquisa para o foco na solução dos problemas e na revitalização hidroambiental e no desenvolvimento de metodologias compatibilizadas entre si, capazes de estabelecer indicadores e gerar índices que possibilitarão avaliar a evolução da qualidade ambiental.

O planejamento do monitoramento deverá levar em consideração a existência de diversos compartimentos geomorfológicos e hidrodinâmicos do rio, que provavelmente devem ter correspondência com o comportamento da fauna e flora aquática. Os processos de ajuste encadeados e espacializados, deduzidos a partir das evidências geomorfológicas pelo subprojeto GEF São Francisco 2.4, deverão ser objeto comprovação por ocasião do programa de monitoramento.

As principais linhas temáticas previstas no monitoramento deverão necessariamente ter um caráter multidisciplinar, abordando os aspectos físicos, bióticos e socioeconômicos, incluindo: ictiofauna e seus nutrientes, plâncton e monitoramento das atividades de pesca e dos resultados do repovoamento por alevinos (marcação genética); cargas sólidas transportadas pelo rio (carga de fundo e carga suspensa); batimetria, correntometria e morfologia fluvial; contribuição dos

afluentes (descarga líquida e sólida, nutrientes); plantas aquáticas, vegetação das margens; qualidade da água (inclusive com relação a agentes poluidores); mensuração do aporte à foz e acompanhamento da dinâmica da foz e zona costeira adjacente.

Os custos previstos são de **US\$ 170.000 para a fonte de financiamento** e a contrapartida das instituições envolvidas deverá totalizar US\$ 360.000.

11.2. Recomendações quanto ao detalhamento do componente do monitoramento ajuste morfodinâmico e erosão marginal no canal e na foz: MONITORAMENTO DA EVOLUÇÃO DO MODELO DE ESPACIALIZAÇÃO DOS AJUSTES MORFODINÂMICOS DO BAIXO CURSO DO RIO SÃO FRANCISCO

Justificativa do Trabalho

Os resultados do mencionado Subprojeto 2.4 GEF São Francisco, demonstraram que intensos processos erosivos estão acontecendo nas margens do baixo São Francisco assim como na sua foz. A quantificação das mudanças e ajustes nas variáveis morfo-hidráulicas do sistema e sua comparação para os períodos pré e pós- barragens resulta de fundamental importância para entender a distribuição dos focos erosivos assim como para subsidiar a tomada de decisões em quanto às obras de engenharia que devem ser construídas para defesa das margens.

Os resultados do projeto 2.4 evidenciaram que a compartimentação do São Francisco pode se transformar numa valiosa ferramenta de gestão.

Sob o ponto de vista geomorfológico e sedimentológico o monitoramento do baixo curso do rio São Francisco e da zona de praia adjacente à sua foz permitirá conhecer melhor e quantificar a mobilização da carga sólida do rio, verificar com mais detalhe as respostas morfológicas do canal e comprovar o modelo proposto pelo subprojeto GEF 2.4 de espacialização dos processos ajustes morfodinâmicos e dos setores onde predominam a erosão ou a sedimentação.

Uma vez que o modelo proposto pressupõe que alguns compartimentos se comportam preferencialmente como área fonte de partículas sedimentares para a carga sólida do rio (através do entalhamento do leito), outros como área de passagem, outros como área preferencialmente de acumulação e, ainda situações de erosão das margens e sedimentação no leito, torna-se necessário comprovar e quantificar a movimentação da carga sólida entre os compartimentos, o que servirá para estabelecer de forma mais aprimorada o modelo inicialmente proposto e permitir monitorar a sua tendência evolutiva, uma vez que o corte de suprimento de carga sólida (retida na barragem) criou uma situação de desequilíbrio, para a qual o rio está se ajustando.

Assim é recomendável acompanhar a evolução destes processos, pois as condições físicas e biológicas, tendem ainda a se modificar ao longo do tempo, até atingir um novo padrão de equilíbrio. Entretanto, estas mudanças poderão ainda afetar de forma mais notável os diversos recursos pesqueiros fornecidos pelo rio e ter conseqüências mais pronunciadas sobre o meio antrópico.

Duração prevista é de 24 meses, como custo para a fonte financiadora de US\$ 150.000 e Contrapartida de US\$ 300.000. O cálculo preliminar deste orçamento baseia-se na execução do projeto por parte de uma equipe local com experiência comprovada nos serviços propostos e com experiência de campo na região, complementada com a contratação de consultores externos.

11.3. Recomendações para estudos de soluções para a contenção da erosão das margens dos perímetros irrigados no baixo curso do rio São Francisco: ESTUDO DE SOLUÇÕES E ELABORAÇÃO DE PROJETO EXECUTIVO PARA A CONTENÇÃO DA EROSIÃO NAS MARGENS DOS PERÍMETROS IRRIGADOS NO BAIXO CURSO DO RIO SÃO FRANCISCO, INCLUINDO EXECUÇÃO EM ÁREA TESTE

Conhecimento do problema

Entre os problemas ambientais atuais do baixo curso do rio São Francisco, a erosão marginal acelerada se destaca pela sua visibilidade, amplitude, ampla distribuição e conseqüências socioeconômicas e hidroambientais. O problema da erosão nas margens do baixo São Francisco tem gerado uma crescente diminuição das áreas de produção nos perímetros irrigados implantados naquela área, acarretando prejuízos para a economia dos dois Estados envolvidos (Sergipe e Alagoas).

A erosão das margens no baixo curso do Rio São Francisco assumiu proporções mais drásticas em dois trechos da margem direita, onde, coincidentemente, encontram-se os perímetros irrigados de Cotinguiba-Pindoba e do Betume, ambos implantados pela CODEVASF no final da década de 1970.

A solução de engenharia empregada pela CODEVASF para a contenção nestes trechos tem sido de caráter emergencial e tem consistido no enrocamento da base dos taludes marginais e reconstrução dos diques marginais em posições mais recuadas em relação à linha de margem original. Estas soluções, entretanto, são paliativas e tem um alto custo financeiro.

Os estudos recentes do Projeto GEF São Francisco, através do Subprojeto 2.4 (Fontes, 2002) demonstraram que as falhas na solução adotada ocorreram em função da mesma não ser adequada para impedir o processo erosivo mais efetivo – a ação da corrente fluvial – o qual atua no nível subaquoso, abaixo da faixa protegida pelos enrocamentos.

O fato relevante demonstrado é que as erosões marginais observadas se inserem em um contexto de ajustes pela qual está passando a dinâmica fluvial, em decorrência dos impactos hidrossedimentológicas-geomorfológicos provocados pela construção e operação das grandes barragens, ao longo do curso do rio São Francisco. Portanto, não se deve tratar o problema como de ordem apenas local, e muito menos apenas tentando proteger diretamente a margem, mas dentro de um contexto mais amplo, inserido em um quadro de grandes mudanças na morfodinâmica do rio.

Recomenda-se a apreciação das possibilidades abaixo expostas, incluindo a avaliação dos seus impactos ambientais, sem prejuízo da inclusão de outras opções. O objetivo principal nas três propostas apresentadas é obter a diminuição da erosão pela relocação do talvegue, redirecionando o escoamento principal do rio, com a utilização de técnicas que devem ser avaliadas quanto à minimização dos impactos ambientais negativos (inclusive visuais ou à navegação) ou que venham a provocar o início de novos focos erosivos rio abaixo ou acima do local da intervenção.

- Recomenda-se à análise das propostas apresentadas a CODEVASF para contenção da erosão através da utilização da técnica de Dragagem Hidráulica (método de POTAPOV).
- Análise da proposta apresentada pelos consultores da Codevasf (Canalli e Agrar Consultoria, 2000), a qual prevê a construção de espigões submersos perpendiculares à margem com a

utilização de sacos confeccionados com material permeável (geotextil) e preenchidos com areia do leito do rio ou da margem.

- Análise da proposta da provocação de cheias artificiais, que teriam o papel de desobstruir o canal, criando novas trajetórias para o talvegue. Neste caso recomenda-se uma análise em modelo reduzido ou virtual. A opção por este modelo deveria passar necessariamente pela realização de uma cheia-teste, precedida por um levantamento detalhado da batimetria/morfologia do canal, bem como a realização de novo levantamento após sua ocorrência para a avaliação de seus resultados e orientação quanto à proposta definitiva

Apresentação de um modelo de transmissão de cheias especificamente elaborado para subsidiar os estudos de erosão/sedimentação e da proposta mitigadora de produção de cheias anuais artificiais como forma de minimizar o problema da erosão marginal.

Uma vez proposta(s) a(s) solução(ões) para a erosão causada subaquosamente pela corrente fluvial, deverão ser estudadas medidas para a minimização da ação erosiva das ondas e correntes secundárias transversais, que atuam no intervalo de oscilação do nível do rio, evitando-se, se possível, a utilização de enrocamentos devido à interferência que os mesmos criam na paisagem e na navegação.

Deverão ser propostas ações para a recuperação das margens, paralelamente ao processo estabilização das mesmas, com a utilização preferencial de técnicas de revegetação com espécies nativas e recuperação de matas ciliares de forma sustentável. A utilização da vegetação só deverá ocorrer depois de iniciado o processo de estabilização, na medida em que já foi demonstrado (Fontes, 2002) que, de uma forma geral, a erosão atual ocorre abaixo do nível das raízes das árvores, portanto, a vegetação não é um meio eficiente de controle de erosões relacionadas à ação do talvegue. Entretanto, desempenham um papel importante na proteção das margens após sua estabilização, na recuperação paisagística e para o ecossistema aquático fluvial.

Recomenda-se a realização de um experimento de campo, precedido ou não de simulação, para teste e avaliação dos resultados da(s) solução(ões) recomendada(s), antes da elaboração do Projeto Executivo final.

Duração prevista para o projeto é de 24 meses, com custos para a Fonte financiador de US\$ 100.000,00 e contrapartida: US\$ 200.000,00

11.4. Recomendações quanto ao gerenciamento da zona costeira (litoral norte de Sergipe): impactos das mudanças na dinâmica fluvial sobre a evolução da zona de praia: EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO BAIXO SÃO FRANCISCO DURANTE O HOLOCENO E AS POSSÍVEIS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS NA ZONA COSTEIRA COMO RESULTADO DA INTERAÇÃO COM A DINÂMICA FLUVIAL PÓS-BARRAGENS

Os resultados do subprojeto GEF São Francisco 2.4, demonstraram que intensos processos erosivos estão acontecendo nas margens do baixo São Francisco assim como na sua foz. Os resultados do projeto 2.4 evidenciaram que a compartimentação do São Francisco pode se transformar numa valiosa ferramenta de gestão.

A construção do “delta” do rio São Francisco, o qual encontra-se atualmente em etapa de erosão em alguns setores, é um produto da evolução do sistema fluvial e costeiro associada à transgressão marinha do Holoceno médio. Embora tenham sido desenvolvidos diversos estudos no “delta” e na região costeira, o conhecimento do sistema fluvial assim como as repostas morfossedimentares do mesmo as mudanças climáticas do Holoceno são praticamente inexistentes.

Para melhorar o conhecimento sobre o funcionamento do sistema fluvial, é necessário ampliar a escala temporal considerada, elaborando um modelo básico de funcionamento no Holoceno mais detalhado, no período pré-impacto antrópico.

A elaboração de mapas de detalhes sobre as unidades geomorfológicas que compõem a planície aluvial do Baixo São Francisco assim como de sua arquitetura sedimentar permitirá entender melhor a distribuição e comportamento das áreas de várzeas e outras unidades da planície aluvial assim como da região de transição costeira, as quais são submetidas a intenso manejo e ocupação humana. A compreensão das interações histórica entre as dinâmicas fluvial e costeira e as respostas na linha de costa, pode se constituir em uma base essencial para a compreensão da evolução futura da zona costeira situada a sul da foz do rio São Francisco (litoral norte de Sergipe), permitindo a elaboração de cenários evolutivos, que venham a subsidiar a proposição de medidas mitigadoras.

Os serviços propostos objetivam elaborar mapas de unidades morfossedimentares da planície aluvial, caracterizar a dinâmica hidrogeomorfológica das mesmas, e elaborar um modelo evolutivo para o sistema desde o Holoceno médio e apresentar medidas de uso/manejo e proteção para áreas críticas, inclusive a eventual proposição da criação de uma APA – Área de Proteção Ambiental.

Duração prevista é de 24 meses, com custos para a Fonte Financiadora de US 100.000 e contrapartida de US\$ 200.000. O cálculo preliminar deste orçamento baseia-se na execução do projeto por parte de uma equipe local com a participação de consultores externos.

ESTUDO DO PROCESSO EROSIVO DAS MARGENS DO BAIXO SÃO FRANCISCO E SEUS EFEITOS NA DINÂMICA DE SEDIMENTAÇÃO DO RIO

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	6
1.1. Após a construção das barragens, um quadro de degradação ambiental	6
1.2. As manifestações da erosão marginal à jusante da barragem de Xingó	12
1.3. Erosão natural ou induzida?	15
2. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DO BAIXO SÃO FRANCISCO	18
2.1. Geomorfologia e hidrografia	18
2.2. Geologia regional	26
2.3. Geologia local	29
2.4. Clima	32
2.5. Vegetação e uso da terra	32
2.6. Demografia	36
3. ANÁLISE DA EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO RIO E DOS IMPACTOS GERADOS PELOS BARRAMENTOS SOBRE A MORFOLOGIA DO CANAL NO TRECHO DO PERÍMETRO IRRIGADO CONTINGUIBA-PINDOBA	38
3.1. Geoprocessamento e análise de fotos aéreas	38
3.1.1. Análise histórica das mudanças na linha de margem	38
3.1.2. Metodologia de geoprocessamento para elaboração de mapa base e realce das profundidades relativas do canal	39
3.1.3. Imagens aéreas e cartográficas	40
3.2. Histórico das manifestações e das soluções para contenção da erosão marginal no baixo São Francisco	41
3.3. A erosão nas margens fluviais dos perímetros irrigados	43
3.4. Evolução espacial e temporal da erosão marginal	49
3.5. Soluções adotadas para contenção da erosão nas margens dos Perímetros Irrigados	55
4. QUANTIFICAÇÃO DA EROSÃO MARGINAL DO PERÍMETRO IRRIGADO COTINGUIBA-PINDOBA	59
4.1. Métodos para a quantificação da erosão marginal e volume erodido	59
4.1.1. Método dos pinos	59
4.1.2. Método das estacas	60
4.1.3. Método das perfilagens sucessivas	61
4.1.4. Descrição do método de cálculo do volume de material erodido	61
4.2. Taxas de recuo das margens erodidas	62
4.2.1. Características do barranco e propriedades mecânicas da margem	65
4.2.2. Problemas encontrados na quantificação da erosão marginal	68
4.3. Volume de material erodido	69
4.3.1. Resultados do monitoramento 1999/2000	69
4.3.2. Resultados do monitoramento da erosão marginal no período 2000/2001	71

5. COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS TALUDES MARGINAIS NAS MARGENS DO PERÍMETRO IRRIGADO COTINGUIBA-PINDOBA	75
5.1. Ensaios geotécnicos dos taludes marginais e atividades de campo	75
5.2. Caracterização geotécnica dos solos	83
5.2.1. Classificação Granulométrica	83
5.2.2. Teor de Umidade	90
5.2.3. Índices de consistência, Coesão e Ângulo de Atrito	94
5.2.4. Erodibilidade dos Solos	96
5.3. Fluxo hidráulico nos taludes	98
5.4. Condições de estabilidade dos taludes	109
5.5. Mecanismos de desestabilização dos taludes	114
6. IMPACTOS AMBIENTAIS E SOCIOECONÔMICOS GERADOS PELA EROSÃO MARGINAL DO PERÍMETRO IRRIGADO COTINGUIBA-PINDOBA	117
6.1. Metodologia de avaliação dos impactos	117
6.1.1. Avaliação da Escala Geográfica	118
6.1.2. Avaliação do Alcance dos Impactos	118
6.2. Avaliação da escala geográfica dos impactos	120
6.3. Avaliação dos impactos nas condições presentes	122
6.3.1. Avaliação dos impactos ambientais e sócioeconômicos nas condições presentes	122
6.3.2. Redução da disponibilidade de água doce e os impactos sócioeconômicos na condição presente	124
6.4. Estimativa dos impactos futuros	128
7. CARACTERIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DA EROSÃO MARGINAL NO BAIXO CURSO DO RIO SÃO FRANCISCO	134
7.1. Mapeamento e observações de campo	134
7.2. Identificação e caracterização dos focos de erosão marginal	134
7.3. Tipos de margens fluviais	148
7.4. Padrões de margens sob erosão e sua distribuição espacial	154
7.4.1. Margem Tipo A (Tipo Pontal da Barra)	154
7.4.2. Margem Tipo B (Tipo Saramen)	155
7.4.3. Margem Tipo C (Tipo Fazenda Mucuri)	155
7.4.4. Margem Tipo D (Tipo Dique)	157
7.4.5. Margem Tipo E (Tipo Betume)	157
7.4.6. Tipo F (Tipo Cotinguiba-Pindoba)	158
8. ANÁLISE DOS FATORES E DAS CAUSAS DA EROSÃO MARGINAL	160
8.1. Fontes de informações	160
8.1.1. Dados secundários	160
8.1.2. Dados hidrológicos primários	160
8.1.3. Entrevistas	161
8.1.4. Levantamento de dados de campo	161
8.1.5. Análise dos dados hidrológicos e sedimentológicos	162
8.2. Fatores e forças hidráulicas atuantes no canal	162
8.3. Fatores geomorfológicos	163
8.3.1. Fator geometria da calha: posição do trecho da margem em relação às curvas do rio e ao talvegue	163

8.3.2. Forma da seção transversal do canal e suas relações com os mecanismos de erosão	165
8.3.3. Mudança temporal e espacial da posição do talvegue	168
8.3.4. Altura e perfil das margens	170
8.3.5. Faixa de praia fluvial	171
8.3.6. Plataforma de abrasão junto às margens	177
8.4. Fatores litológicos geotécnicos, pedológicos e processos erosivos associados	177
8.4.1. Fatores litológicos e geotécnicos	177
8.4.2. Fatores pedológicos (topo das margens)	189
8.5. Fatores relacionados à sazonalidade natural do rio (regime hidrológico natural do “Velho Chico”)	190
8.5.1. A sazonalidade natural no baixo curso do rio São Francisco (1926-1976)	190
8.5.2. Variação interanual das vazões e o papel das enchentes na dinâmica fluvial	192
8.6. Fatores ligados a dinâmica estuarina e costeira	195
8.6.1. Marés em estuários	196
8.6.2. Variações diárias das marés naturais no baixo curso do rio São Francisco	197
8.6.3. Variações sazonais e excepcionais nas amplitudes de marés e seus reflexos no estuário/rio: discussão sobre o papel das marés na erosão marginal	200
8.7. Fatores climáticos regionais e ação das ondas produzidas pelo vento	207
8.8. Fatores relacionados à construção e operação das barragens e ao novo regime hidrosedimentológico (“o Novo Chico”)	209
8.8.1. A construção e operação da cascata de grandes barragens rio acima	210
8.8.2. Fases sob influência das barragens e os papéis exercidos por Sobradinho e Xingó	211
8.8.3. A variação interanual das vazões após 1978: as alterações na sazonalidade natural do rio e o controle das enchentes	214
8.8.4. A operação das usinas hidrelétricas e as oscilações artificiais das vazões efluentes	222
8.8.5. A retenção dos sedimentos nas barragens e as alterações no transporte sedimentar à jusante	225
8.8.6. As respostas do canal à diminuição no aporte de carga sólida: assoreamento e erosão	232
8.9. O papel da cobertura vegetal das margens e dos remanescentes da mata ciliar	232
8.9.1. O papel vegetação como fator de proteção das margens	233
8.9.2. Por que então preservar a mata ciliar?	239
8.9.3. Cobertura vegetal atualmente presente entre Propriá e a foz	241
8.9.4. Mudanças na vegetação das margens nos últimos anos	242
9. SINTESE DA DINÂMICA E EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS MARGINAIS	245
9.1. Ação conjunta dos processos erosivos e sua atuação em relação ao nível do rio	245
9.2. Síntese do papel exercido pela flutuação do nível do rio e dos movimentos gravitacionais no ciclo erosivo	247
9.3. O papel exercido pela ação da corrente fluvial na evolução da erosão das margens	251
9.4. Controles temporais da erosão: margens sob erosão contínua e episódica	252
9.5. O ciclo evolutivo das margens sob erosão contínua	253

10. COMPARTIMENTAÇÃO DO SISTEMA FLUVIAL E SUA INFLUÊNCIA NOS AJUSTES MORFO-DINÂMICOS DO CANAL, EM RESPOSTA ÀS ALTERAÇÕES NO REGIME HIDRO SEDIMENTOLÓGICO	256
10.1 Considerações sobre a geomorfologia, sedimentologia e paleohidrologia de grandes rios	256
10.2. Compartimentação morfo-sedimentar do baixo do rio São Francisco à jusante de Xingó	257
10.2.1. Caracterização do Compartimento I	258
10.2.2. Caracterização do Compartimento II	258
10.2.3. Caracterização do Compartimento III	258
10.2.4. Caracterização do Compartimento IV	265
10.2.5. Compartimento V	268
10.3 Considerações sobre a evolução do sistema fluvial e estuarino (do Holoceno médio até o presente)	271
10.4. Modelo de propagação dos ajustes morfo-sedimentares complexos no período pós-barragens e de respostas diferenciadas de acordo com a compartimentação do sistema fluvial	278
10.4.1 Compartimento I	278
10.4.2 Compartimentos II e III	281
10.4.3 Compartimento IV	282
10.4.4 Compartimento V	284
10.4.5 A nova dinâmica fluvial pós-barragens e o incremento da erosão marginal nos compartimento III e IV	286
10.5. Encadeamento e hierarquia dos impactos geomorfológicos gerados pelas barragens no baixo São Francisco e análise comparativa com os estudos de casos internacionais	287
10.5.1 Impactos Geomorfológicos de Primeira Ordem	291
10.5.2 Impactos Geomorfológicos de Segunda Ordem	294
10.5.3 Impactos Geomorfológicos de Terceira Ordem	296
10.5.4 Impactos Geomorfológicos de Quarta Ordem	299
11. DIVULGAÇÃO DOS RESULTADOS E INTERAÇÃO COM A SOCIEDADE	305
11.1 Promoção de eventos para o público e divulgação nos meios de comunicação	305
11.1.1 Solenidade de lançamento do subprojeto 2.4	305
11.1.2 Workshop de Divulgação dos Resultados do Projeto GEF São Francisco	311
11.1.3 Campanha de divulgação do workshop	317
11.1.4 Participação do público e avaliação do workshop	321
11.2 Impacto relevante: constituição de grupo de pesquisa interinstitucional e interação com o Comitê da Bacia	323
12 CONCLUSÕES	325
12.1 Quanto a evolução histórica da erosão marginal no trecho do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba	325
12.2 Quanto a distribuição espacial dos focos de erosão marginal ativa e suas características morfológicas e litológicas	325
12.3 Quanto a ação conjunta dos processos erosivos, à dinâmica e a evolução dos processos erosivos marginais	326
12.4 Quanto aos fatores e processos relacionados à corrente fluvial que participam da erosão marginal	327

12.5 Quanto aos fatores ligados a dinâmica estuarina e ao papel exercido pela flutuação do nível do rio e dos movimentos gravitacionais na evolução do ciclo erosivo das margens	327
12.6 Quanto à forma como a regularização das vazões promovidas pelas grandes barragens influenciam na erosão marginal	328
12.7 Quanto a alteração na sazonalidade natural do rio promovida pelas grandes barragens e as conseqüências para a erosão marginal	329
12.8 Quanto à retenção dos sedimentos nas barragens e as alterações no transporte sedimentar à jusante	329
12.9 Quanto ao novo comportamento da dinâmica fluvial e as formas de propagação dos ajustes morfodinâmicos nos diversos compartimentos do canal, em resposta às mudanças do regime hidro-sedimentológico impostas pelas barragens	330
12.10 Quanto as causas, ao encadeamento e hierarquia dos impactos geomorfológicos gerados pelas barragens e análise comparativa com os estudos de casos internacionais	332
12.11 Quanto ao cenário teórico para a evolução dos impactos na faixa costeira adjacente à foz	333
13 RECOMENDAÇÕES	334
13.1 Recomendações quanto ao monitoramento ambiental múltiplo do rio e articulação interinstitucional	334
13.1.1 Conhecimento do problema	335
13.1.2 Caracterização do Programa de Pesquisa e Monitoramento Proposto	337
13.1.3 Envolvimento com a comunidade ribeirinha	338
13.1.4 Indicações metodológicas e produtos	338
13.1.5 Duração e custos previstos	341
13.2 Recomendações quanto ao detalhamento do componente do monitoramento: ajuste morfodinâmico e erosão marginal no canal e erosão na zona de praia adjacente à foz	341
13.2.1 Justificativa do Trabalho:	341
13.2.2 Atividades a serem desenvolvidas	342
13.2.3 Resultados e produtos esperados:	345
13.2.4 Duração e Local de trabalho:	345
13.2.5 Relatórios	346
13.2.6 Orçamento estimado para execução	346
13.3 Recomendações para estudos de soluções para a contenção da erosão das margens dos perímetros irrigados no baixo curso do rio São Francisco	347
13.3.1 Conhecimento do problema	347
13.3.2 Especificações Técnicas dos Serviços	348
13.3.3 Duração e Custos	350
13.4 Recomendações quanto ao gerenciamento da zona costeira (litoral norte de Sergipe: impactos das mudanças na dinâmica fluvial sobre a evolução da zona de praia	351
13.4.1 Justificativa do Trabalho:	351
13.4.2 Objetivo do trabalho a ser desenvolvido:	351
13.4.3 Atividades a serem desenvolvidas:	352
13.4.4 Resultados e produtos esperados:	352
13.4.5 Duração e Local de trabalho	352
13.4.6 Relatórios	353
13.4.7 Orçamento estimado para execução	353

14 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	354
14.1 Específica do Baixo São Francisco	354
14.2 Geral	359
15 ATORES	369
15.1 Entidades	369
15.2 Equipe do Subprojeto	369

ANEXO 1

- Impactos ambientais provocados por grandes barragens: modificações na hidrologia e na geomorfologia dos canais fluviais

Autores: Luiz Carlos da Silveira Fontes

Sandra Baptista Cunha

ANEXO 2

- Dados levantados e gerados pelo subprojeto 2.4 no perímetro irrigado cotinguiba-pindoba e dados levantados sobre a vegetação das margens do baixo curso do rio São Francisco

LISTA DE FIGURAS

1. Subdivisões fisiográficas da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco	2
2. Mapa de localização da área estudada (em azul), limites da subbacia (traço vermelho) e detalhe do baixo curso do rio São Francisco, entre Propriá e a foz.	3
3. Montagem com matérias de jornais de Aracaju (Cinform, Correio de Sergipe e Jornal da Cidade) publicadas em 2001 e 2002.	7
4. Manifestações na imprensa, sobre os problemas causados pela erosão marginal, publicadas nos jornais de Aracaju, Cinform, Correio de Sergipe, em 2001 e 2002.	13
5. Fotomontagem evidenciando a evolução do processo erosivo e recuo da linha de costa no Povoado Cabeço na foz do rio São Francisco.	14
6. Mapa geológico da região da foz do rio São Francisco e da planície costeira associada, no litoral norte do Estado de Sergipe.	16
7. Mapa Geológico simplificado do litoral de Sergipe, onde pode-se observar a feição deltaica desenvolvida na foz do rio São Francisco.	19
8. Perfil longitudinal topográfico do rio São Francisco no trecho submédio e baixo, com os aproveitamentos hidrelétricos.	20
9. Pequenas várzeas do Baixo São Francisco	22
10. Síntese das unidades geomorfológicas do Baixo São Francisco.	23
11. Síntese das unidades geomorfológicas do Baixo São Francisco sergipano.	24
12. Mapa geológico de Sergipe/Alagoas da região da Bacia do São Francisco, com o rio São Francisco na parte central.	27
13. Mapa tectono-estratigráfico de Sergipe	28
14. Mapa Geológico do Baixo São Francisco, entre Propriá e Foz (Margem Sergipana).	30
15. Mapa Geológico do Baixo São Francisco, entre Porto Real do Colégio e a Foz (Margem Alagoana).	31
16. Variação climática e pluviométrica na bacia hidrográfica do rio São Francisco.	33
17. Várzeas e Perímetros Irrigados da CODEVASF no baixo São Francisco.	34
18. Cobertura vegetal original na sub-bacia do Baixo São Francisco.	35
19. Síntese do mapeamento temático de uso do solo na sub-bacia do Baixo São Francisco.	36
20. Mapa temático de uso da terra no Baixo São Francisco.	37
21. Localização do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba e do 1º dique de contenção de cheias, projetado em 1974 e construído em 1985.	44
22. Mapa apresentando sucessivas linhas de margens (1962, 1984 e 2001) do rio São Francisco, reconstituídas a partir de mapas topográficos e fotos aéreas.	46
23: Localização das seções de monitoramento do processo erosivo.	47
24. Foto aérea da região de Cotinguiba-Pindoba obtida em 1950, período de enchente.	50
25. Mapa topográfico (1962) da região da várzea do Cotinguiba	51
26. Montagem de fotos aéreas de 1973, com interpretação das linhas de fluxo principais	52
27. Foto aérea do rio obtida em dezembro 1984.	53
28: Foto aérea de janeiro 1988, em período de enchentes.	54
29. Montagem de fotos aéreas obtidas em 2000. Reconstituição da posição anteriormente ocupada pelo 1º dique.	56
30. Recuo da linha de margem, destruindo a faixa de terreno anteriormente existente entre a estrada e a margem do rio. Foto a) obtida em 24/5/99 e b) em 8/11/99.	57
31 a) Foto obtida em 11.04.01 no Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba. b): Foto do mesmo local, porém em direção oposta, obtida quatro meses após a foto anterior (08/2001).	58

32. Taxas de erosão mensal nas seções monitoradas – A, B e C – no período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2000, utilizando o método das estacas.	63
33. Erosão acumulada no período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2000 nas seções monitoradas.	63
34. Resultado da análise granulométrica da seção A nas 04 (quatro) diferentes camadas que compõem a face do barranco.	67
35. Resultado da análise granulométrica da seção B nas 04 (quatro) diferentes camadas que compõem a face do barranco.	67
36. Resultado da análise granulométrica da seção C nas 04 (quatro) diferentes camadas que compõem a face do barranco.	68
37. Representação da superposição dos levantamentos topográficos realizados na seção A.	72
38. Representação da superposição dos levantamentos topográficos realizados na seção B.	73
39. Representação da superposição dos levantamentos topográficos realizados na seção C.	73
40. Vista aérea do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba no trecho afetado pela erosão na margem do rio.	74
41. Representação esquemática da Instrumentação do talude na seção A.	75
42. Representação esquemática da Instrumentação do talude na seção B.	75
43. Representação esquemática da Instrumentação do talude na seção C.	76
44. Representação gráfica do método de Bishop (1955) – Superfície circular.	83
45. Composição granulométrica do solo no INA N° 1 da seção A (Quadro 7).	84
46. Composição granulométrica do solo no INA N° 2 da seção A (Quadro 7).	84
47. Composição granulométrica do solo no INA N° 3 da seção B (Quadro 7).	88
48. Composição granulométrica do solo no INA N° 4 da seção B.	88
49. Composição granulométrica do solo no INA N° 5 da seção C.	90
50. Perfil de umidade das amostras de solo no INA N° 1 da seção A desde a superfície até a profundidade de 6,30m.	91
51. Perfil de umidade do solo no INA N° 2 na seção A desde a superfície até a profundidade de 5,45m	91
52. Perfil de umidade das amostras de solo no INA N° 3 da seção B desde a superfície até a profundidade de 5,10m.	92
53. Perfil de umidade do solo no INA N° 4 na seção B desde a superfície até a profundidade de 6,13m.	92
54. Perfil de umidade nas amostras de solo no INA N° 5 da seção C desde a superfície até a profundidade de 5,42m.	93
55. Tensão capilar em água suspensa e coesão aparente	94
56. Correlação constante entre a razão coesão/tensão efetiva e o índice de plasticidade.	96
57. Flutuações dos níveis de água no rio e nos INA s N° 1 e N° 2 da seção A. Janeiro de 2002 a Fevereiro de 2002.	101
58. Correlação entre o nível do rio e o nível do lençol freático na distância de 18,54m da margem do rio na seção A (INA N°1).	102
59. Correlação entre o nível do rio e o nível do lençol freático na distância de 46,34m da margem do rio na seção A INA N° 2.	103
60. Flutuações dos níveis de água no rio e nos INAs da seção B. Janeiro de 2002 a Fevereiro de 2002.	103
61. Correlação entre o nível do rio e o nível do lençol freático na distância de 9,27m da margem do rio na seção B (INA N° 3).	104
62. Correlação entre o nível do rio e o nível do lençol freático na distância de 37,47m da margem do rio na seção B.	105
63. Flutuações dos níveis de água no rio e no INA N° 5 da seção C no período de Janeiro a Fevereiro de 2002.	105

64. Correlação entre o nível do rio e o nível do lençol freático na distância de 11,90m da margem do rio na seção C (INA N° 5).	106
65. Dados de cotas dos níveis da água do rio, INA N° 1 e INA N° 2, como referência para a indicação da direção de fluxo de água subterrânea na seção A, no período de janeiro de 2002 a fevereiro de 2002.	107
66. Dados de cotas dos níveis da água do rio, INA N° 3 e N° 4, como referência para a indicação da direção de fluxo de água subterrânea na seção B no período de janeiro de 2002 a fevereiro de 2002.	108
67. Dados de cotas dos níveis de água do rio, INA N° 5, como referência para a indicação da direção de fluxo de água subterrânea na seção C, no período de janeiro de 2002 a fevereiro de 2002.	108
68. Representação esquemática da superfície crítica e do fator de segurança FS do talude da seção A, na situação de pré-retaludamento.	110
69. Representação esquemática da superfície crítica e do fator de segurança FS do talude da seção A, na situação de pós-retaludamento.	111
70. Representação esquemática da superfície crítica e do fator de segurança FS do talude da seção B.	112
71. Representação esquemática da superfície crítica e do fator de segurança FS do talude da seção C.	112
72. Representação esquemática dos principais mecanismos de desestabilização dos taludes marginais estudados no Baixo curso do Rio São Francisco.	115
73. Mapa das sub-regiões geográficas da GIWA indicando os grandes ecossistemas marinhos.	117
74. Mapa do baixo curso do rio São Francisco, entre Propriá e a foz, dividido em segmentos e feições geomorfológicas identificadas.	136
75. Geomorfologia do SEGMENTO I da calha do baixo curso do rio São Francisco	137
76. Geomorfologia do SEGMENTO II do baixo curso do rio São Francisco	140
77. Geomorfologia do SEGMENTO IV da calha do baixo curso do rio São Francisco.	144
78. Perfil vertical da velocidade da corrente no canal fluvial do rio São Francisco, em frente a cidade de Neópolis (Segundo, 2001).	163
79. Imagem obtida a partir do geoprocessamento de imagem de satélite. Imagem de satélite SPOT, de 1991.	166
80. Interpretação do traçado da linha de talvegue principal. Imagem de satélite Landsat 1990.	167
81. Perfil batimétrico esquemático, transversal ao foco erosivo ME	167
82. Perfil esquemático transversal ao canal, baseado em levantamento batimétrico efetuado pela CODEVASF em novembro 1999 e em junho 2001.	168
83. Perfil batimétrico transversal pouco metros a montante da Ponte de Propriá.	168
84. Mapa elaborado em 1853 pelo Engenheiro Halfeld.	169
85. Perfis topográficos transversais à margem, em vários pontos do trecho submetido à erosão, indicando (em amarelo) a porção retirada pela erosão.	172
86. Mapa topográfico de trecho de margem sob erosão (Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, foco erosivo ME-52) com localização dos perfis da Figura 46.	173
87. Perfil estratigráfico vertical da margem tipo não-coesiva, do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba	181
88. Coluna vertical representativa de margem de constituição mista. ME-32 (Ilha São Pedro)	186
89. Variação sazonal das vazões médias mensais durante o período 01/1927 a 12/1929 na Estação Fluviométrica de Pão de Açúcar.	191
90. Distribuição anual da precipitação média mensal em Piranhas (AL) período 1942-1999	191
91. Variações interanuais de vazões médias mensais, no período 08/1938 a 12/1973, na Estação Fluviométrica de Traipu.	192

92. Variação interanual das vazões médias mensais durante o período 12/1926 a 12/1973, na Estação Fluviométrica de Pão de Açúcar.	193
93. Variação do nível do rio, no período entre 01/1980 e 12/87, na Estação Fluviométrica de Propriá	194
94. Divisão do Sistema Estuarino de acordo com Fairbridge (1980)	196
95. Leituras do nível do rio às 7:00 e às 17:00 horas, durante um mês, antes da influência das barragens. Estação Fluviométrica de Cotinguiba-Pindoba	198
96. Esquema explicativo para a geração de marés de sizígia e quadratura.	200
97. Variação horária do nível de maré em Piaçabuçu (Alagoas), rio São Francisco, durante 10 dias do mês de setembro 2000.	201
99. Correlação entre taxas de erosão e velocidade média dos ventos, em dois pontos (A e B) da margem do Perímetro Irrigado Pindoba.	209
100. Barragens e respectivos reservatórios no rio São Francisco, nas sub-bacias do Baixo (A) e Submédio (B).	210
101. Variações interanuais das vazões médias mensais no período de 01/1977 a 12/2000, na estação fluviométrica de Propriá.	214
102. Detalhamento das variações interanuais das vazões médias mensais, em um período de 10 anos (1977-1987), na estação fluviométrica de Propriá.	215
103. Variações interanuais das vazões médias mensais na estação fluviométrica de Pão de Açúcar, entre 01/1987 e 12/1994.	216
104. Vazões naturais afluentes em Sobradinho entre 1993 e 1998.	217
105. Variações interanuais das vazões médias mensais na estação fluviométrica de Propriá, entre 01/1994 e 12/2000.	218
106. Variações interanuais das vazões médias mensais na estação fluviométrica de Pão de Açúcar, no período 01/1994 a 12/2000.	218
107. Variação sazonal das vazões regularizadas no baixo curso do rio São Francisco, na estação fluviométrica de Propriá, no período de fevereiro 1999 a janeiro 2000.	219
108. Variações dos níveis d'água na estação fluviométrica de Pão de Açúcar, em julho de 1988.	223
109. Defluências horárias na Usina Hidrelétrica de Xingó, em 18/07/2001 (quarta).	224
110. Defluências horárias em Xingó no dia 05/08/2001 (domingo).	224
111. Defluências horárias da UHE Xingó (Figura A), no período de 01 a 31/07/2001 e correspondentes variações das vazões diárias nas estações fluviométricas de Piranhas, Pão de Açúcar Traipu e Propriá (Figura B).	226
112. Oscilações do nível do rio no período de 01 a 31/07/2001 nas estações fluviométricas de Piranhas, Pão de Açúcar e Propriá.	227
113. Esquema simplificado do papel exercido pela barragem de Xingó na retenção da carga sólida.	229
115: Percepção dos pescadores sobre vegetação ciliar como forma de proteção das margens do rio São Francisco	
116: Síntese da atuação dos conjuntos de processos erosivos	246
117: Dinâmicas ambientais as quais se relacionam os conjuntos de processos erosivos: fluvial e estuarina.	246
118: Foto aérea onde se percebe uma grande forma de leito (barra/banco arenoso) sob as águas do rio	250
118: Deposição acentuada de areias, formando barras submersas no leito do rio, logo a jusante dos focos erosivos de Cotinguiba-Pindoba e Ilha do Sobrado.	252
119. Compartimentação do Baixo Rio São Francisco	259
120. Compartimentação do Baixo Rio São Francisco .	260

121. Composição de imagens de satélites Landsat do baixo curso do rio São Francisco, à jusante da barragem de Xingó, com indicação dos nodos e dos compartimentos fluviais.	261
122. “Canyon” do São Francisco no compartimento I em Imagem Landsat.	262
123: Imagem Landsat do compartimento II	263
124: Imagens Landsat 5 TM do compartimento III.	264
125. Imagem Landsat 5 TM do compartimento IV.	266
126. Padrão entrelaçado do Compartimento IV, no trecho entre Propriá e Pindoba	267
127. Imagem Landsat 5 TM do compartimento V.	269
128. Área de sedimentação fluvial holocénica de Penedo-Penedinho (margem esquerda).	271
129. Mapa geomorfológico da planície costeira associada à desembocadura do Rio São Francisco	272
130. Curva do nível do mar nos últimos 5.000 anos no litoral norte	273
131. Mapa paleogeográfico da porção sul da planície costeira associada à desembocadura do rio São Francisco, atual litoral de Sergipe, por volta de 5.600 AP	274
132. Modelo evolutivo proposto por Dominguez et al, 1996 para a costa norte do Estado da Bahia	275
133. Mapa paleogeográfico da porção sul da planície costeira associada à desembocadura do rio São Francisco, atual litoral de Sergipe, por volta de 5.600 AP	276
134. Esquema geral do comportamento morfodinâmico dos compartimentos II, III, IV e V no período pré-barragens	277
135. Perfil batimétrico transversal do rio São Francisco na estação fluviométrica de Piranhas (AL). Compartimento II.	279
136. Superposição da seqüência histórica de perfis batimétricos transversais (1990-2000). Estação Fluviométrica de Piranhas.	280
137. Perfil batimétrico transversal do rio São Francisco na estação fluviométrica de Piranhas (AL). Compartimento II.	281
138. Matéria publicada no Jornal Cinform, Aracaju, dezembro 2001	283
139. Modelo esquemático da morfodinâmica fluvial no período pré e pós-barragem de Xingó.	287
140. Corrente litorânea norte-sul, ao longo das costas de Alagoas e Sergipe e a “pluma” de sedimentos na foz do rio São Francisco.	303
141. Montagem de matérias publicadas na imprensa sobre o lançamento do subprojeto 2.4	307
142. Folder de divulgação do Subprojeto 2.4	308
143. Recortes de matérias divulgadas na imprensa do Workshop interno do Subprojeto 2.4	309
144: Folder do Workshop Interno do Subprojeto 2.4	309
146. Matérias publicadas na imprensa sergipana sobre o workshop interno	310
145. Cartaz do Workshop Interno do Subprojeto 2.4	310
147. Pasta distribuída aos participantes do workshop	311
148. Cartaz do workshop de divulgação dos resultados	317
149. Folder do workshop de divulgação dos resultados	318
150. Convite encaminhado às entidades para participação no workshop	319
151. Abertura do VT vinculado na TV Sergipe, na semana do evento.	320

LISTA DE FOTOS

1. Placa identificadora das obras de realinhamento do dique e de contenção da erosão.	46
2. Foto da instalação dos pinos na face do barranco – detalhe do pino ao centro.	60
3. Foto da instalação das estacas na superfície do barranco do rio.	61
4. Vista lateral de uma construção localizada à margem do rio, na área de estudo	70
5. Vista lateral de uma construção localizada à margem do rio, na área de estudo,	70
6. Foto mostrando a destruição, pela erosão, do 2º dique (em primeiro plano) no Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba	74
7. Foto mostrando a situação do talude marginal na seção A, antes do retaludamento.	76
8. Foto mostrando a situação do talude marginal na seção A, depois do retaludamento.	77
9. Foto mostrando a coleta de amostra de solo e instalação do INA na seção C.	78
10. Feições de movimentação e trincas no trecho entre as seções A-B.	78
11. Foto mostrando a leitura do nível de água do rio no Piquete N° 1 da seção A.	80
12. Foto mostrando a leitura do nível de água do solo no INA N° 1 da seção A.	80
13. Foto mostrando a atuação da água do rio no processo de solapamento na base do talude marginal na seção A	100
14. Margem estável constituída por arenitos da Formação Penedo e recoberta por mata ciliar.	148
15. Fotomontagem exibindo três momentos distintos no desenvolvimento de margens em acreção	149
16. Praia fluvial estreita, em trecho sob erosão. A faixa de areias úmidas são uma evidência da recente descida do nível do rio, na zona de intermarés.	174
17. Praia em margem de ilha, próxima ao Foco Erosivo ME-57 (Ilha Major Cesário).	174
18. Margem submetida à erosão, sem faixa de praia e com talvegue adjacente.	175
19. ME-5 (Povoado Saramen). Faixa de praia larga, limitada por pequena escarpa erosiva, só alcançada pelas ondas produzidas em marés excepcionalmente altas.	175
20. Redistribuição de partículas argilosas em suspensão	178
21. Foco erosivo ME-22.	178
22. Margem constituída por argilas de provável origem fluvio-lagunar.	179
23. Margem de ilha constituída por areias muito friáveis, exibindo estratificações cruzadas tabulares.	180
24. Margem da calha principal constituída por areias fluviais com intercalações de níveis argilosos de consistência plástica e carbonosos	182
25. Base de margem da calha principal constituída por areias de origem fluvial.	182
26. Comportamento geotécnico diferenciado entre a camada superior siltica e a inferior arenosa não-coesiva.	183
27. Visão geral da margem do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba (ME-52).	184
28. Fendas geradas na camada superior do barranco, indicando a eminência da queda do bloco.	184
29. Flagrante da ocorrência de um fluxo de grãos na margem do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba (ME-52)	185
30. Foto obtida após o abaixamento do nível do rio durante o ano de 2001, o qual expôs a camada de argila da base.	187
31. Margem estratificada tipo mista. Ponto ME 32, face montante da Ilha de São Pedro.	187
32. Margem constituída por dique construído pelo homem, em processo de erosão.	188
34. Foto evidenciando a atuação da erosão fluvial por corrasão, abaixo do nível do solo e das raízes.	189
35. Foto aérea de lagoa marginal ainda existente, baixo São Francisco, em 2001.	194
36. Foto apresentando a faixa úmida e com sedimentos lamosos, sobre bloco de rocha	199

37. Barrancos marginais só atingidos durante as marés excepcionalmente altas.	202
38. Flagrante da atuação recente de marés excepcionalmente fortes e altas na região da foz do rio São Francisco.	202
39. Impacto direto das ondas sobre camada de sedimentos argilosos, durante a subida da maré, 2001.	204
40. Detalhe da atuação direta das ondas, promovendo solapamento e deslizamento de blocos de areias, em margem de ilha fluvial.	205
41. Foto apresentando detalhe da quebra da onda (a), seguida do espraiamento (b) na zona de intermarés.	205
42. Foto apresentando detalhe da formação das micro-escarpas por ação das ondas.	206
43. Detalhes da ação erosiva das ondas.	206
44. Foto apresentando uma visão geral dos efeitos erosivos produzidos da ação das ondas em margem arenosa não vegetada, associados à flutuação do nível das águas.	207
45. As ondulações que se formam sobre as barras arenosas submersas são indicativas de transporte atual de areia no leito em 26/06/2001, com vazão de 1.000 m ³ /s.	222
46. Foto apresentando marcas deixadas pelo recuo das águas após a subida diária (nas primeiras horas do dia) do nível do rio	227
47. A foto registra a ação das ondas, solapando a base do barranco e produzindo uma micro-escarpa na base. Margem do rio São Francisco, próximo a Gararu.	228
48: Margem com mata ciliar preservada.	234
49: Estágio preparatório para a abertura de um foco erosivo marginal	235
50: Erosão abaixo do nível das raízes das árvores: a) pela instabilidade e desmoronamento da camada superior do barranco; b e c) pela corrente fluvial; d) pelas ondas associadas às subidas das marés.	236
51: Queda de árvores do topo da margem, junto com o desmoronamento de blocos arenosos da parte superior do barranco	237
52: Blocos desmoronados do topo do barranco contendo ainda restos do solo e gramíneas, em margem arenosa.	237
53: Restos de árvores arrancadas das margens pela erosão representam um sério risco de acidentes com embarcações fluviais	238
54: Destruição da vegetação das margens (restos de troncos, raízes de coqueiros e vegetação de mangues) pela erosão marginal	
55. Margem estável com desenvolvimento de aninga e balseiro	240
56: Flagrantes da ação das ondas durante marés de sizígia (marés excepcionalmente altas)	247
57: Areias saturadas por água na base do barranco devido à recente subida do nível do rio e, conseqüentemente, do lençol freático.	247
58: Remoção das partículas e blocos na base do barranco por ação de ondas e correntes secundárias.	248
59: Perfil verticalizado de uma margem sob erosão acelerada. O canal principal/talvegue encontra-se aderente à margem.	249
60: Os contínuos desmoronamentos e fluxos de grãos da parte superior do barranco formam uma espécie de franja, na parte intermediária e base do barranco	249
61: Fotos exibem exemplos da ação conjugada de processos gravitacionais	250
62: Fotos exibem exemplos da ação conjugada de saturação das areias da base e remoção das partículas e blocos na base do barranco por ação de ondas e correntes secundárias.	251
63: A ocorrência de trechos muito rasos ao longo do rio é uma das conseqüências da presença de um banco arenoso submerso na parte central do canal.	251
64: Estágios de evolução da erosão marginal em margens sob erosão contínua	255
65. “Canyon” do São Francisco no compartimento I.	262

66: Estreita faixa de depósitos arenosos fluviais nas margens. Canyon do São Francisco no Compartimento I	263
67. Relevo de morros característico do Compartimento III e estreita planície aluvial	264
68. Barra central (midchannel bar).	265
69. Vista do São Francisco na região à montante de Penedo, desde a margem Alagoana à margem Sergipana (Compartimento IV).	266
70. Compartimento IV. Barra arenosa formada principalmente por estruturas cruzadas planares (litofácies SP de Miall, 1985).	268
71. Afloramento de arenitos da Formação Penedo, formando o nodo Penedo/Neópolis	269
72. Padrão anastomosado visualizado por ocasião de período de inundação.	270
73. Depósitos argilosos formadores das ilhas do compartimento V contendo restos de vegetais	270
74. Fotos da solenidade de lançamento do Subprojeto 2.4 GEF São Francisco	306
75. Área externa do local de realização do workshop	312
76. Vista geral do público presente ao workshop	312
77. Mesa da solenidade de abertura do workshop	313
78. Apresentação das palestras pelos coordenadores dos subprojetos e mesa de coordenação das discussões	314
79. Reunião de membros eleitos do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco	316
80. Plenária de encerramento do workshop com a participação dos membros eleitos do CBHSF	
81. Faixas de rua para divulgação do workshop	320
82: Flagrantes da participação do público na plenária de encerramento	323

LISTA DE QUADROS

1. Síntese dos problemas ambientais mais citados nas publicações sobre o Baixo São Francisco como decorrentes dos barramentos rio acima na área do canal.	8
2. Síntese dos problemas ambientais mais citados nas publicações sobre o Baixo São Francisco como decorrentes dos barramentos rio acima na área marginal.	11
3. Características hidrológicas das sub-bacias sergipanas da bacia São Francisco	25
4. Relação de Mapas planimétricos com cobertura da área do baixo curso do rio São Francisco, organizados de forma cronológica	42
5. Relação de Fotos Aéreas com cobertura da área do baixo curso do rio São Francisco, organizados de forma cronológica.	42
6. Volume de material erodido nas três seções estudadas no período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2000.	45
7. Taxas de erosão mensal e anual nas três seções monitoradas, utilizando o método das estacas e o método dos pinos.	62
8. Características morfológicas das seções monitoradas.	64
9. Características das seções instrumentadas.	66
10. Volume de material erodido nas três seções estudadas no período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2000.	69
11. Características dos principais grandes grupos de processo de escorregamento.	81
12. Resumo dos ensaios de caracterização nas amostras de solo na seção A.	85
13. Resumo dos ensaios de caracterização das amostras de solo na seção B.	87
14. Resumo dos ensaios de caracterização das amostras de solo na seção C.	89
15. Valores típicos de ângulo de atrito das argilas na cidade de São Paulo.	95
16. Valores típicos de ângulo de atrito de areias	97
17. Classificação do solo quanto a erodibilidade pelo ensaio de Dispersão	97
18. Apresentação das cotas máximas, médias e mínimas dos níveis de água nas seções A, B e C.	99
19. Classificação dos taludes nas seções A, B e C quanto a estabilidade.	110
20. Pontuação dos impactos sócioeconômicos nas condições presentes	119
21. Impactos ambientais e sócioeconômicos comparativos do problema ambiental redução de água doce.	120
22. Aspectos Ambientais associados ao problema ambiental Redução da Disponibilidade de Água Doce.	121
23. Pontuação dos impactos na condição presente	122
24. Impactos sócioeconômicos identificados associados ao problema ambiental Redução da disponibilidade de água doce nas condições presentes no Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.	124
26. Pontuação dos Impactos Econômicos nas Condições Presentes	126
27. Pontuação dos impactos da erosão sobre a saúde nas condições presentes	127
28. Pontuação dos impactos sociais e comunitários nas condições presentes.	127
29. Quadro de pontuação dos impactos nas condições futuras	129
30. Pontuação dos impactos econômicos nas condições futuras no Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.	130
31. Pontuação dos impactos da erosão sobre a saúde nas condições futuras	131
32. Pontuação dos impactos sociais e comunitários nas condições futuras	131
33. Avaliação dos impactos sócioeconômicos do problema redução da disponibilidade de água doce nas condições futuras	132

34. Impactos ambientais e sócioeconômicos comparativos do problema ambiental redução de água doce	132
35. Média ponderada do Problema Ambiental Redução de Água Doce	133
36. Segmento I: Aspectos descritivos dos trechos de margens submetidos à erosão ativa	138
37. Segmento II - Aspectos descritivos dos trechos de margens submetidos à erosão ativa	141
39. Segmento IV: Aspectos descritivos dos trechos de margens submetidos à erosão ativa	145
40. Tipos de margens segundo a altura	150
41. Tipos de Margens segundo o perfil transversal	150
42. Tipos de Margens segundo a locação na calha fluvial	151
43. Tipos de Margens segundo locação em relação ao talvegue do canal	152
44. Tipos de Margens segundo os materiais constituintes (litologia e estratigrafia)	152
45. Tipos de Margens segundo a vegetação na face e base do barranco	153
46. Síntese descritiva das margens do tipo A (Tipo Pontal da Barra)	154
47. Síntese descritiva das margens do tipo B (Tipo Saramen)	155
48. Síntese descritiva das margens do tipo C (Tipo Fazenda Mucuri)	156
49. Síntese descritiva das margens do tipo D (Tipo Dique)	157
50. Síntese descritiva das margens do tipo E (Tipo Betume)	158
51. Síntese descritiva das margens do tipo F (Tipo Cotinguiba-Pindoba)	159
52. Estações fluviométricas da ANEEL/ANA do baixo São Francisco, à jusante de Xingó, selecionadas para análises fluviométricas	161
53. Correlação entre as condições climáticas e hidrológicas sazonais do Alto e Baixo São Francisco	192
54. Exemplos de algumas medidas de nível do rio efetuadas pela CODEVASF, na estação fluviométrica de Cotinguiba-Pindoba, em dois períodos distintos do mês.	199
55. Ordem cronológica da entrada em operação das Usinas Hidrelétricas construídas ao longo do rio São Francisco.	212
56. Variações no transporte de sedimentos no rio São Francisco no período anterior à construção da barragem de Sobradinho.	230
57. Estimativa do transporte de sedimentos no ano 2000	231
59. Vegetação encontrada anteriormente em grande quantidade na margem do rio São Francisco	243
60. Plantas incomuns anteriormente e hoje freqüentes na margem do rio São Francisco, segundo respostas obtidas junto aos pescadores entrevistados nos Municípios de Propriá, Santana do São Francisco, Neópolis, Ilha das Flores e Brejo Grande (Período: agosto a outubro de 2000).	244
61: Sequência dos impactos ambientais identificados à jusante da barragem de Xingó	289