



## **MORFODINÂMICA FLUVIAL EM ÁREAS SEMIÁRIDAS: DISCUTINDO O VALE DO RIO JAGUARIBE-CE-BRASIL**

### **FLUVIAL MORPHODYNAMIC IN SEMI-ARID AREAS: DISCUSSING THE JAGUARIBE RIVER VALLEY, CE-BRAZIL**

**Andréa Almeida Cavalcante**

*Professora da Universidade Estadual do Ceará. Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal Fluminense - Rua. Dr. José Lourenço, 2879/ 802. Bairro Joaquim Távora. CEP 60.115-282. Fortaleza-Ce. Fone: (85) 32574129/ (85)99919887 - e-mail: andreauece@gmail.com.*

**Sandra Baptista da Cunha**

*Professora do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal Fluminense. Pesquisadora CNPq. - Rua Afonso Pena 141/ 204. Tijuca. Rio de Janeiro. Fone (21) 96286947 - e-mail: sandracunha@openlink.com.br*

---

#### **Resumo**

O trabalho discute o funcionamento dos ambientes fluviais em regiões semiáridas, trazendo, como estudo de caso, um recorte espacial para o vale do Jaguaribe, Estado do Ceará. Na discussão são apresentadas questões sobre o barramento de cursos d'água e suas repercussões na morfodinâmica de canais. Para a realização do trabalho, foram utilizados dados do monitoramento de 11 (onze) estações distribuídas entre a barragem do Castanhão e a cidade de Jaguaruana, onde foram levantadas medições de vazão, concentração de sedimentos, largura e profundidade do canal. O perfil longitudinal foi feito a partir de dados de SRTM, utilizando o software ArcGis 9.3. Os resultados mostram que os processos fluviais são rápidos e intensos em regiões semiáridas, necessitando o aprofundamento de estudos diferenciados em relação àqueles realizados em regiões tropicais úmidas. No vale do Jaguaribe, os dados mostram que grandes barramentos mudam as condições morfológicas de jusante, entretanto, levam algum tempo para serem percebidas. Tais alterações são observadas à jusante das barragens de Orós, Várzea do Boi e Castanhão. A jusante da barragem do Castanhão as mudanças são menos perceptíveis, haja vista o tempo de construção da mesma (2002). Se morfologicamente as alterações provocadas por um barramento podem levar um tempo maior para serem visíveis, hidrológica e sedimentologicamente as variações podem ser vistas de modo mais rápido. Nesse sentido, altera-se principalmente as amplitudes de vazões que influenciam na redução de descarga sólida e, conseqüentemente, alteram padrões de canais a médio e longo prazo.

**Palavras-chave:** Semiárido; Canais; Morfodinâmica.

#### **Abstract**

This paper presents an overview of fluvial-environmental operation on semi-arid region, and includes a case study of the Jaguaribe-Valley, which is located in the state of Ceará. The discussion highlights questions about dams and their repercussion on the morphodynamic of channels. Beyond the theoretical discussion, to accomplish this experiment, data was collected from 11 (eleven) stations distributed between the Castanhão dam and Jaguaruana, such as measurement flows, concentration of sediment, and width and depth of cross sections. The longitudinal profile was made from SRTM data, using ArcGis 9.3. The study results show that intensity of the fluvial processes that occur in semi-arid regions needs to be studied differently from processes that occur in humid areas. At the Jaguaribe Valley, the data analyzed indicate that dams, particularly large ones, morphologically change the downstream. However, it takes time for such changes to be registered. This is the situation which

has caused the downstream changes observed at the Orós, Várzea do Boi and Castanhão dams. The downstream effects of the Castanhão dam are the least noticeable because the dam was built in 2002. If morphologically, the influences of a dam may take a long time to be visible, water and sedimentology variations can be seen quickly. In this sense, changes affect mainly the amplitude of the flow, influencing the reduction of the solid-load, and consequently change the channels' patterns in the medium and long term.

**Word-keys:** Semi-Arid; Channels; Morphodynamic.

## Introdução

Rios de terras secas (Drylands Rivers) é um termo coletivo usado para designar as regiões hiperáridas, áridas, semiáridas e sub-úmidas secas do mundo (TOOTH, 2000). Embora necessite ser fortalecido, o estudo sobre a dinâmica fluvial em áreas áridas e semiáridas tem se destacado, sobretudo, na região central da Austrália, sul da África e América do Norte, necessitando maior atenção na América do Sul e Ásia. De acordo com Tooth (2000), tais estudos ilustram a necessidade de entendimento de rios de regiões áridas e semiáridas usando relações empíricas, termos e conceitos adicionais em relação àqueles definidos em trabalhos anteriores.

Contribuições importantes nessa área foram dadas por Graf (1988) que discutiu de forma detalhada os processos fluviais em rios de áreas semiáridas, e mais recentemente, por Nanson, Tooth e Knighton (2002), cujo trabalho resgata todo o histórico de estudos nessa área, fazendo uma análise global sobre regime hidrológico, transporte de sedimentos, geometria e padrões de canais, além de condições de equilíbrio e não equilíbrio especificamente para áreas áridas e semiáridas.

Os estudos fluviais na América do Sul estão voltados, na grande maioria, para as áreas tropicais onde os rios são perenes. Em meio à primazia dos estudos fluviais estarem voltados para áreas úmidas, Tooth (2000) também coloca que o desenvolvimento da teoria para rios de regiões secas tem contado com ideias importadas de trabalhos realizados em rios de caudal permanente, o que pode trazer problemas, uma vez que muitos processos fluviais, de magnitude e frequência particulares, diferem da maioria das regiões úmidas de modo considerável.

Naturalmente, é importante enaltecer trabalhos basilares que fizeram parte da construção dos fundamentos da Geomorfologia Fluvial como um todo, como os de Mackin (1948), Leopold, Wolman e Miller (1964), Leopold (1973), Gregory e Walling (1973), Gregory e Park (1974), Schumm (1977), Leopold e Bull (1979), Christofolletti (1981), Carling e Petts (1992), Nanson e Croke (1992), Knighton (1998), Cunha (1995b), Brandt (2000), Latrubesse et al (2005) e Latrubesse (2008).

De modo paralelo, avaliando os reflexos das intervenções humanas sobre os ambientes fluviais, a discussão sobre os impactos de barramentos vem ganhando força, estando entre um dos mais significativos do ponto de vista das al-

terações na dinâmica de canais. Segundo Brandt (2000), o número de barragens tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas. De acordo com o autor, em 1900 existiam 427 grandes barragens (maiores que 15m), em torno do mundo, enquanto em 1950 e 1986, já existiam 5.268 e 39.000, respectivamente. As regiões com maior aumento de grandes barragens durante o período de 1975-1990 foram América do Sul e Central, Ásia e Oceania (GLEICK, 1993).

Entre os trabalhos realizados no âmbito dos processos sedimentológicos em áreas semiáridas Brasileiras, alguns destes têm se concentrado na bacia do São Francisco, pela dimensão e importância em escala de Brasil, embora as nascentes deste rio estejam localizadas fora da fronteira do Nordeste Brasileiro (em áreas de fortes precipitações). Nessa linha, destacam-se ainda trabalhos como o de Cavalcante (2001) e de Wiegand (2009) que trabalharam transporte de sedimentos no Baixo e Alto Jaguaribe no Ceará, respectivamente.

Ainda que segundo Ab'Saber (2003), o Nordeste Brasileiro seja a região semiárida mais povoada do mundo, com cerca de 23 milhões de brasileiros, onde o uso da terra se faz pensando a proximidade dos mananciais naturais e artificiais, tanto para sobrevivência como para a exploração econômica, parece que o interesse do ponto de vista do entendimento dos processos hidrossedimentológicos, tão importantes para fazer melhor uso da terra, ainda não é tão proeminente. E isto carrega consigo a grande dificuldade do desenvolvimento de estudos com base em dados históricos, fato também corroborado por Bartley et al. (2007).

Embora os problemas relacionados ao assoreamento, à erosão ou, ainda, às inundações estejam igualmente presentes no contexto semiárido, não há muita clareza dos processos atuantes nessas áreas. Por essa razão, em meio a uma área tão densamente ocupada, conhecer e entender a dinâmica fluvial no semiárido é tarefa importante, senão imprescindível, para melhor planejamento no uso da terra.

O presente trabalho busca desenvolver uma discussão teórica sobre dinâmica de canais em áreas semiáridas, levando em consideração as mudanças morfológicas provocadas por barramentos. Além disso, apresenta algumas observações sobre o vale do Jaguaribe-Ceará, onde se inclui abordagens sobre perfil longitudinal e o impacto de barragens, e sobre o comportamento hidrossedimentológico do canal na área de estudo.

## O Semiárido Brasileiro

O semiárido Brasileiro envolve uma área de 969.589,4 km<sup>2</sup>, cerca de 60% do Nordeste e 11,34% do território Brasileiro. Segundo Ab'Saber (2003) esta é a região seca mais homogênea do ponto de vista fisiográfico, ecológico e social entre todas as outras igualmente secas do continente Sul-Americano. Caracteriza-se de modo fundamental pelo grande vazio das precipitações que dura de seis a sete meses por ano, ficando entre 268 e 800 mm, contraste bastante visível quando comparado com a região amazônica que atinge precipitações anuais cerca de 8,5 a 14 vezes os totais pluviométricos dos sertões menos chuvosos. Entretanto, a média das precipitações anuais serve apenas para referência, pois o ritmo entre os anos é altamente irregular, podendo ter anos de chuvas intensas, caracterizando os anos de cheias, e os anos de seca extrema, quando praticamente não chove.

É também nessa grande região seca que estão distribuídos cerca de 70.000 reservatórios superficiais, o que torna o semiárido a região mais açudada do Planeta. Segundo Ribeiro (2008), não há região no Globo, árida ou semiárida, com tamanha capacidade de acumulação. Cerca de um cubo de 37 bilhões de m<sup>3</sup>, ou ainda, um terço do que o São Francisco despeja anualmente no Atlântico. “Numa distribuição geográfica equitativa disporíamos de um açude a cada 14 km<sup>2</sup> por toda a superfície do Polígono das Secas” (RIBEIRO, 2008).

Uma região marcada por canais de fluxos intermitentes não poderia deixar de expressar uma dinâmica sazonal tão intensa, capaz de construir canais ao mesmo tempo largos e intermitentes. Prova dessa dinâmica está no fato de que todos os rios do Nordeste, em algum tempo do ano, chegam ao mar, ao contrário de outras regiões semiáridas do mundo em que

os rios e bacias hidrográficas convergem para depressões fechadas (Ab'SABER, 2003).

## O Rio Jaguaribe no Semiárido Cearense

Representando um importante exemplo de comportamento de drenagem no Semiárido Nordestino, o rio Jaguaribe, objeto de estudo dessa pesquisa, cuja bacia engloba cerca de 50% do Estado do Ceará, possui cerca de 610 km de extensão e 74.000 km<sup>2</sup> de bacia hidrográfica (figura 1). Tamanho extensão desse rio em pleno semiárido, levou-o a ser considerado o maior rio seco do mundo (CAMPOS, 2006), embora hoje tenha grande parte de seu canal perenizado por barragens, que garantem maior fonte de recursos hídricos ao Estado.

As nascentes dos principais cursos d'água formadores do rio Jaguaribe estão em declividades que variam de 15 a 25m km<sup>-1</sup>. No alto curso, o rio Jaguaribe possui baixa sinuosidade (1,2), largura de margens plenas (bankfull) que pode variar de 60-180m e profundidade que pode alcançar 3m. No médio e baixo curso a sinuosidade do Jaguaribe varia de 1,2 (montante) a 1,5 (próximo à foz) e a largura de margens plenas (bankfull) do canal varia 150m a 450m, dependendo do trecho analisado.

O Rio Jaguaribe assume diferentes padrões de canais em sua transição do médio ao baixo curso, já que no alto curso, onde os processos erosivos estão mais evidentes, torna-se difícil definir um padrão de canal. O que é possível perceber é que a baixa sinuosidade (1,2) denota um canal e pode se aproximar de um padrão reto. No médio, onde as áreas deposicionais são espacialmente maiores, diferentes padrões geométricos e hidráulicos induzem a formação de padrões de canais também diferenciados.

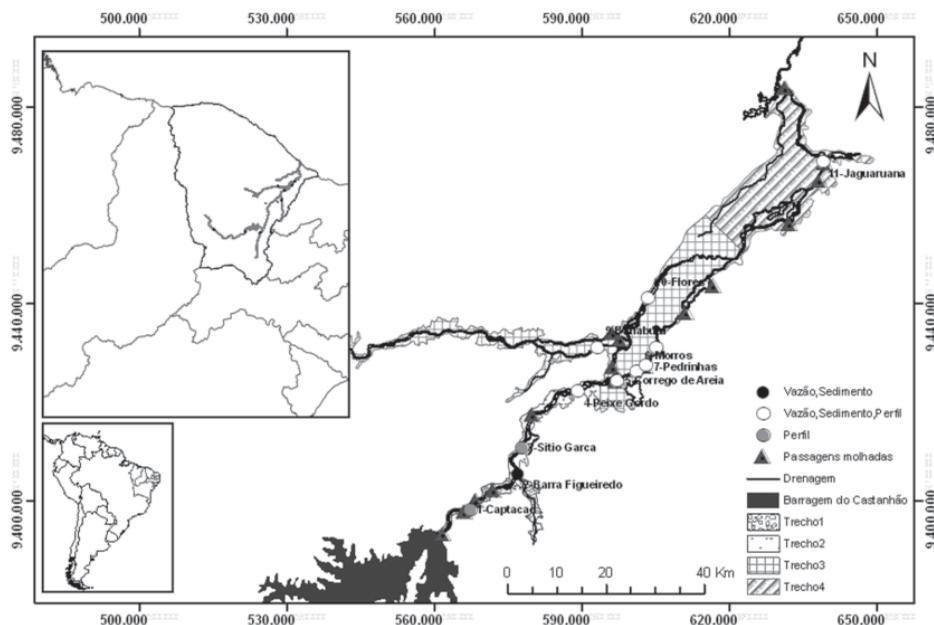


Figura 1 - Área de estudo mostrando divisão dos trechos e estações de monitoramento. Sistema de referência: SAD 69 - zona 24 S. Projeção em UTM. Elaboração: Andrea Cavalcante.

Canais largos e rasos em áreas de forte variação de descarga (como é o caso de áreas semiáridas), com barras intercaladas no meio do canal e baixa resistência à erosão podem apresentar instabilidade. Isso promove o retrabalhamento das barras em curtos espaços de tempo, transformando o talvegue rapidamente e alterando o posicionamento do canal entre um ano e outro. De acordo com Carson (1984) e Knighton e Nanson (1993), canais que experimentam esse tipo de instabilidade são denominados wandering braided ou simplesmente wandering, e se constituem numa forma intermediária entre entrelaçados e meandranes, possuindo características de ambos os tipos (CHARLTON, 2008). Embora para alguns autores canais entrelaçados (braided) simbolizem situações de desequilíbrio dos rios, Leopold e Wolman (1957) e Knighton (1998), consideram que existe uma forma de equilíbrio válida para esses canais que se diferenciam de rios realmente instáveis.

Xu (1996), estudando o Hanjiang River na China, observou que canais wandering braided podem estar relacionados a três fatores: Alta variação sazonal e anual de descarga; alta carga de material de fundo; e localização topográfica e material das margens do canal. Corroborando, Graf (1988) considera ainda que quando o regime de fluxo de um rio possui grande amplitude entre máximas e mínimas, tais rios podem apresentar padrões compostos, variando entre entrelaçados (em águas altas) e meandranes (em águas baixas). Para o autor, o padrão entrelaçado é o que mais predomina em áreas semiáridas.

Observando o médio-baixo curso do rio Jaguaribe, onde a largura de margens plenas (bankfull) pode alcançar 450m, e onde é comum a formação de bancos arenosos devido aos grandes volumes de sedimentos de fundo transportados em episódios de chuvas acima das normais, é possível que grande parte desse trecho o rio assume um padrão composto, podendo ser considerado um wandering em períodos de estio, e entrelaçado (braided) entre períodos de chuva.

Como ocorre em grande parte dos rios do Nordeste, o rio Jaguaribe encontra-se, na atualidade, fortemente regularizado por um grande número de barragens de pequeno, médio e grande porte, em que a barragem do Castanhão (6,7 bilhões de m<sup>3</sup>), em funcionamento desde 2002, se destaca como a maior garantia de água para o Estado. Por outro lado, outras formas de barramentos, menos expressivos, são comuns nos rios dessa bacia. Trata-se de pequenos barramentos denominados pas-

sagens molhadas, cujas estruturas permitem que uma lâmina d'água passe por cima da parede. A finalidade principal desses pequenos barramentos é a conexão entre comunidades em períodos de estio (figura 2).



Figura 2 - Passagem molhada das Pedrinhas, tipo concretada com comporta lateral. Observar lâmina d'água passando por cima do barramento (período de estio). Set/ 1999. (Foto: Andrea Cavalcante)

## Metodologia

A área de estudo compreende o trecho de 183km do rio Jaguaribe entre a barragem do Castanhão e a barragem de Itaiçaba, ponto limite entre a área fluvial e estuarina deste rio (figura 1).

Para efeito desse estudo a área foi dividida em quatro trechos de acordo com a configuração morfológica do canal (tabela 1), onde foram coletados dados de vazão, sedimento e batimentria da seção, totalizando 17 campanhas entre 2006 e 2010. Para as medições de vazão foi utilizado um molinete do tipo hélice para descargas até 100 m<sup>3</sup>/s e ADCP para altas vazões. Para as coletas de água utilizou-se uma garrafa de integração vertical para determinação das concentrações.

Dados históricos de vazão (hidroWeb-ANA) para estações a montante da barragem também foram analisados para efeitos comparativos nos períodos pré e pós barramento. Os levantamentos topográficos foram realizados em 11 seções transversais (sete nos mesmos locais das medições de vazões e três distribuídos à montante e à jusante da entrada do rio Figueiredo) com o uso de uma estação total. O perfil longitudinal do rio Jaguaribe foi traçado com base no cruzamento de informações do canal principal do rio com os dados de declividade extraídos do SRTM (2000), utilizando o software ArcGis 9.3.

Tabela 1 - Caracterização dos trechos do rio Jaguaribe entre a Barragem do Castanhão e a barragem de Itaiçaba.

Trecho	Critério	Condições de Margens e Uso	Estações de Monitoramento			Nº de PM
			Q	S (SS)	PT	
1 – Barragem Castanhão – Rio Figueiredo (afluente margem direita)	Limite da entrada de afluente importante de margem direita: rio Figueiredo.	Vegetação nativa descaracterizada e difíceis de ser identificadas em alguns setores. Baixo uso agrícola.	1	1	2	4
2 - Rio Figueiredo (afluente) – Bifurcação do Rio Jaguaribe em Limoeiro do Norte	Limite para início de bifurcação principal do trecho.	Vegetação nativa descaracterizada, porém com setores parcialmente conservados em Peixe Gordo. Margens melhor definidas. Uso agrícola especialmente mais próximo às cidades.	1	1	2	1
3 - Bifurcação do Rio Jaguaribe em Limoeiro do Norte – Encontro dos Rios Jaguaribe- Banabuiú/ Quixeré	Canal se bifurca, formando dois braços com dinâmica diferenciada. Entrada de afluente importante de margem esquerda: rio Banabuiú.	Vegetação nativa bastante descaracterizada no canal à esquerda. Margens de difícil identificação em alguns setores. Forte ocupação. Áreas urbanizadas. Uso agrícola com produção de arroz na planície e fruticultura na chapada do Apodi. Canal à direita mais conservado (rio Quixeré)	4	4	6	8
4 – Encontro dos Rios Jaguaribe- Banabuiú/ Quixeré/ Passagem Molhada de Itaiçaba	Canal passa a se tornar único após bifurcações até o limite do último barramento (passagem molhada).	Vegetação nativa bem descaracterizada, porém com setores conservados. Margens melhor definidas. Forte ocupação. Uso agrícola e carcinicultura em maior escala. Área urbanizada.	1	1	1	4

Q – Vazão; S – sedimento (sólidos suspensos); PT – perfis transversais; PM – passagens molhadas.

### Perfil Longitudinal e Barramento de cursos d'água

A morfologia de um canal pode ser entendida a partir da inter-relação de três variáveis: seção transversal, forma do canal e perfil longitudinal. Consecutivos trechos de declividades diferenciadas se combinam para criar o perfil longitudinal de um rio que, em escala temporal e espacial, reflete sua história geológica e tectônica, bem como os ajustes recentes de seus padrões de canais (RICHARDS, 1982). No decorrer de um perfil longitudinal desenvolvem-se uma série de perfis transversais que também se diferenciam longitudinalmente em função das características hidráulicas e sedimentológicas (variáveis independentes) de cada trecho.

Nessa elaboração, cada rio constrói seu próprio perfil de equilíbrio, através de ajustes entre descarga líquida, carga de sedimentos, declividade e material de fundo. A forma do perfil reflete o ajuste do rio por diferentes fatores, sendo geralmente representado por uma curva côncava para o céu, uma vez que busca atingir o equilíbrio entre a carga que entra e a que é transportada (MACKIN, 1948; LEOPOLD et al., 1964; CHISTOFOLETTI, 1981; Richards, 1982; CUNHA, 1995b). A inversa relação entre gradiente e descarga do canal reconhecida por Gilbert já em 1877, explica a concavidade do perfil longitudinal para rios perenes, uma vez que a en-

trada de tributários causa aumento da descarga a jusante, proporcionando maior transporte de sedimentos e redução das declividades (RICHARDS, 1982), ou seja, quando a descarga aumenta rapidamente com o aumento da área de contribuição, a concavidade do perfil também cresce.

Entretanto, a partir de observações realizadas em canais aluviais semiáridos, onde a descarga diminui a jusante em razão da evaporação e infiltração nos leitos arenosos, além das perdas por transmissão em até 75% do fluxo entre 25-100 km, identificou-se que tais rios revelam o inverso, apresentando um perfil tipicamente convexo como resultado da agradação durante raros eventos de enchentes (SCHUMM, 1961).

A figura 3 mostra a forma atual do perfil longitudinal do rio Jaguaribe, cujo modelado suave aproxima-se de configuração convexa. Conforme Schumm op cit, eventos de enchentes comuns em áreas semiáridas, promovem a agradação do perfil, tornando-o mais abaulado para o céu.

Ainda sobre a concavidade do perfil, Leopold (1964) destaca que quanto mais rápido o material de fundo diminui em granulometria, em direção de jusante, mais côncavo será o perfil. Do contrário, o perfil pode apresentar pequena concavidade. Pode ser o caso do rio Jaguaribe apresenta D50 entre 1,0 e 2,8 (mm), ou seja, uma granulometria de fundo que varia entre areia média a muito grossa de modo especial no médio-baixo Jaguaribe. Inclusive em alguns setores do

baixo curso, cascalhos são evidentes no leito fluvial, podendo influenciar na forma do perfil.

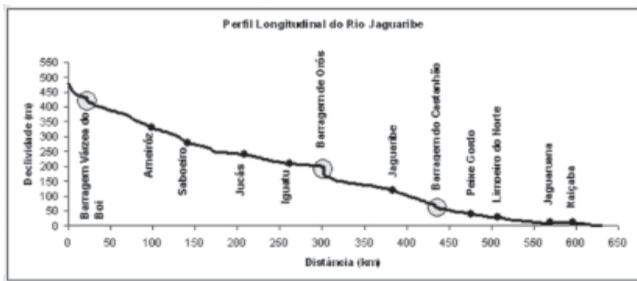


Figura 3 - Perfil longitudinal do rio Jaguaribe. Principais barragens (O) e principais cidades e localidades (●). Base de dados: Imagens SRTM/2000. Elaboração: Andrea Cavalcante.

Adicionalmente, destaca-se que este rio possui três grandes barragens (duas no Alto e uma no Baixo curso), além da sequência de passagens molhadas ao longo de seu canal principal, o que precisa ser considerado na discussão sobre o perfil deste rio.

Embora possam ter diversas funcionalidades, tanto as barragens como os açudes afetam as condições naturais de descarga líquida de alguma forma, podendo determinar mudanças que, a longo prazo, produzem novas condições de estabilidade, através da relação entre a capacidade de transporte de fluxo e a carga de sedimentos liberada do reservatório, junto com a relação entre erosividade de fluxo e erodibilidade de margens (MACKIN, 1948; CUNHA, 1995a; BRANDT, 2000; CARVALHO, 2008).

Para mostrar os efeitos de um barramento no fluxo natural de um rio, a figura 4 apresenta uma correlação entre  $Q_{máx}$  (vazão líquida máxima) e área de drenagem para a bacia do Jaguaribe, mostrando as características naturais deste rio (vazão tende a aumentar com a área de drenagem). A estação de Peixe Gordo, que está à jusante da Barragem do Castanhão, foi utilizada para mostrar as interferências provocadas por um barramento. Observe que a estação de Peixe Gordo reduz cerca de 80% de suas máximas entre o período Pré-barramento e Pós-barramento.

Ainda com relação à figura 3, observa-se que a maior diferença, em termos longitudinais, é vista na altura da barragem de Orós, cuja construção finalizava-se no final da década de 1960. Entretanto, ressalta-se que nesse trecho o rio Jaguaribe corta um flanco de dobramento formado por xistos da Série Ceará (Pré-Cambriano) o que justifica o declive acentuado. Naturalmente, a inserção da barragem induz um aumento de processos erosivos à jusante, mas neste caso as características naturais do relevo precisam ser consideradas.

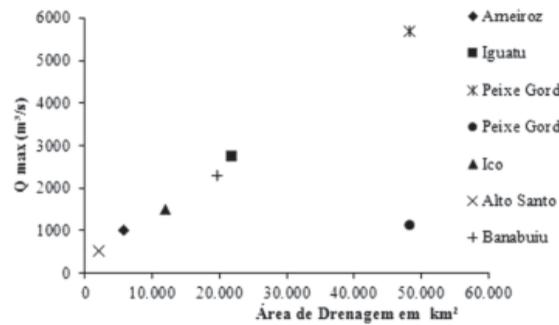


Figura 4 - Relação entre vazão líquida máxima e área de drenagem de algumas estações monitoradas pela ANA ao longo do rio Jaguaribe, desde suas nascentes. Organizado por Andréa Cavalcante.

Em proporções menores, também é possível evidenciar erosão a jusante da barragem da Várzea do Boi (capacidade 52 milhões de m³), construída na década de 1950. A jusante da barragem do Castanhão o perfil não apresenta grandes alterações, possivelmente em razão de ser uma obra de construção recente (2002). Mesmo sabendo que esta barragem esteja em funcionamento há onze anos, onde neste período houve três anos de cheias consideráveis (2004, 2008, 2009), as curvas de nível utilizadas e extraídas das imagens SRTM são datadas de 2000, o que não permitiria visualizar as alterações significativas neste trecho.

Analisando de forma detalhada o trecho do rio Jaguaribe entre a Barragem do Castanhão e a foz é possível observar a distribuição espacial das passagens molhadas (PM) ao longo do perfil longitudinal do trecho em enfoque (figura 5). De modo geral, observa-se que a cada concentração de PM o perfil mostra certo escalonamento, razão pela qual levanta-se a hipótese de que as PM devam provocar alterações no perfil especialmente quando há proximidade considerável entre as mesmas. Do contrário, como pode ser observado, quanto maior as distâncias entre as mesmas, menores são as evidências de alterações no perfil. Este é o caso do trecho entre as PM 5 e 7 que distam 46 km e onde o perfil não mostra escalonamento.

Thoms e Walker (1993) afirmam que o efeito de um açude (aqui entendido como passagem molhada) pode ser pequeno em comparação ao de uma barragem, mas quando combinado com sucessivos açudes, este pode ser até mesmo superior aos das barragens.

Embora as barragens provoquem mudanças no perfil longitudinal dos rios, estes irão sempre buscar nova condição morfológica de equilíbrio, sendo apenas uma questão de tempo. Alguns pesquisadores têm procurado entender a complexidade do reajuste da morfologia para inferir uma estimativa de tempo para o sistema se reequilibrar. Cunha (1995a), ao citar Bruma e Day (1977), diz que nenhuma

resposta do canal pode ser observada em menos de cinco anos do represamento e que essas trocas podem perdurar por mais de 50 anos.

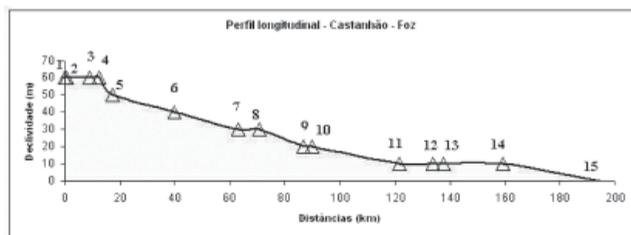


Figura 5 - Perfil Longitudinal do rio Jaguaribe no trecho Barragem do Castanhão-foz, com destaque para a espacialização das passagens molhadas representadas pelos triângulos. 1) Barragem do Castanhão; 2) Jaguaribara; 3) Jaguaribara 4) Sítio Recanto - Alto Santo; 5) Bom Jesus - Alto Santo; 6) Sítio Coco - São João; 7) Tabuleiro do Norte; 8) Pedrinhas - Limoeiro do Norte; 9) Quixeré; 10) Cabeça Preta - Lim. do Norte; 11) Lagoa vermelha - Jaguaruana; 12) Serafim Dias - Jaguaruana; 13) São José - Jaguaruana; 14) Itaiçaba; 15) Foz. Elaboração: Andrea Cavalcante.

### Dinâmica Morfológica e Sedimentológica a jusante da barragem do Castanhão

A tabela 2 e figura 6 mostram as características morfológicas dos 4 (quatro) trechos já apresentados, onde estão agrupadas 11 (onze) seções que foram monitoradas (ver também figura 1).

O primeiro trecho que vai da Barragem até a entrada do rio Figueiredo (afluente de margem direita) apresenta baixa sinuosidade (1,2), largura de margens plenas (bankfull) que pode alcançar 330m e média de 2,6m em profundidade. Bancos arenosos marcam todo o percurso dificultando o

caminho do fluxo que a cada passagem de período chuvoso experimenta uma mudança. O trecho caracteriza-se pelo padrão de canal wandering variando a entrelaçado em vazões de margens plenas (bankfull), as quais somente são possíveis quando da abertura das comportas da barragem.

As margens arenosas e desprotegidas podem se constituir fontes de sedimentos para a calha fluvial acentuando a formação de bancos principalmente na estação 2. As baixas taxas de concentração observadas entre 2009 e 2010 (3 mg l<sup>-1</sup> a 24 mg l<sup>-1</sup>) também são justificadas pela predominante granulometria grosseira (areia muito grossa a cascalho) dos sedimentos de fundo (tabela 2), evidenciando que a carga de leito pode superar a carga em suspensão nesse trecho.

O segundo trecho apresenta sinuosidade maior (1,4) e depósitos de barras em todo o percurso. A largura de margens plenas (bankfull) varia de 300m a 400m, mostrando que o canal possui um histórico de intensa dinâmica. A presença de material de leito de granulometria predominante grosseira (areia média a grossa) propicia os depósitos de barras e as margens coesas (silte) dificultam a erosão lateral. As características do canal nesse trecho também sugere um padrão que alterna entre um tipo instável e entrelaçado entre períodos de estiagem e chuva.

Entre as coletas realizadas foi possível observar a estação de Peixe Gordo em condições de vazões elevadas (1.567 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) o que pode sugerir um possível nível de margens plenas (bankfull), que se constitui num dado de coleta difícil. Para a mesma coleta, dados de concentração também foram coletados. Entretanto, os valores não variaram significativamente (2 mg l<sup>-1</sup> a 50 mg l<sup>-1</sup>) como ocorre no alto Jaguaribe (20 mg l<sup>-1</sup> a 400 mg l<sup>-1</sup> em Iguatu) de acordo com Wiegand (2009).

Tabela 2 - Dados hidrológicos, sedimentológicos e geométricos das seções transversais observadas em cada trecho.

Trecho	Decliv. Média (cm km <sup>-1</sup> )	Nº de Passagens Molhadas	Seção (1)	Posição (2)	Largura (L) MP (m)	Prof. Média (P) (m)	Capac. Canal (m <sup>2</sup> )	L/P (m)	D50 (m) fundo
1	36	4	1	2	323,50	4,284	1.385,87	75,51	0,0028
			2	2	-	-	-	-	0,002
2	47	1	3	2	334,87	1,621	542,82	206,58	0,0005
			4	3	402,40	3,000	1.207,20	134,13	0,00035
			5	3	368,20	4,229	1.557,12	87,07	0,0028
			6	3	147,49	3,751	553,23	39,32	0,001
3	38	8	7	3	194,98	4,061	791,81	48,01	0,002
			8	3	155,72	3,782	588,93	41,17	0,002
			9	3	246,00	4,000	984,00	61,50	0,0014
			10	3	404,00	2,917	1.178,47	138,50	0,0014
4	20	4	11	3	284,51	5,439	1.547,45	52,31	0,00035

(1) 1-Captação; 2-Barra do Figueiredo; 3-Sítio Garça; 4-Peixe Gordo; 5-Córrego de Areia; 6-Morros; 7-Pedrinhas; 8-Cabeça Preta; 9-Banabuiú; 10-Flores; 11-Jaguaruana.

(2) 1- Alto Curso; 2- Médio Curso; 3- Baixo Curso. Fonte: Autor. (-) Dados inexistentes. MP - Margens Plenas (Bankfull).

A partir do terceiro trecho o rio Jaguaribe se divide em dois canais e ainda recebe um afluente de margem esquerda

(rio Banabuiú). Neste trecho estão distribuídas seis estações.

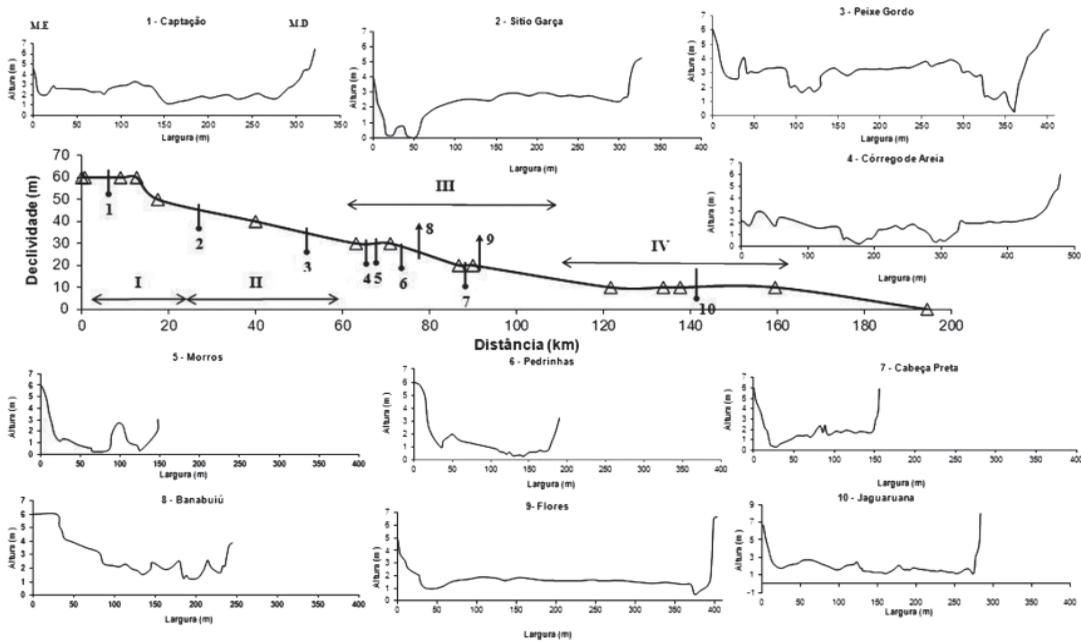


Figura 6 – Distribuição dos perfis transversais ao longo do perfil longitudinal do rio Jaguaribe no trecho Barragem do Castanhão-Foz. O perfil 8 foi realizado em um afluente da margem esquerda (Rio Banabuiú). O perfil 9 está no braço esquerdo do rio Jaguaribe, a jusante da entrada do rio Banabuiú. Portanto, a posição dos perfis 8 e 9 mostram uma aproximação de sua localização. I, II, III e IV significam os trechos. Os triângulos referem-se à espacialização das passagens molhadas. Todos os perfis estão plotados da margem esquerda (ME) para margem direita (MD). Data: 20.01.09.

A bifurcação inicia-se na altura do município de Tabuleiro do Norte (baixo curso), onde o rio se divide em dois braços com características completamente diferenciadas (figura 1). O braço esquerdo, que recebe as águas do rio Banabuiú, atualmente apresenta um trecho de aproximadamente 10km que fora extremamente explorado na década de 80 pela cultura irrigada do arroz. Espaços de várzeas e margens foram amplamente desmatados para o cultivo dessa cultura, o que gerou um acelerado processo de assoreamento do canal e respectiva migração de suas águas para o canal mais jovem (braço direito).

Diferente dos demais canais já apresentados, cuja largura varia até 400m, as estações situadas no braço direito do rio Jaguaribe mostram perfis mais estreito e profundos, típicos de um rio jovem possuindo no máximo 200m de largura (ver estações de Morros, Pedrinhas e Cabeça Preta, figura 6).

No último trecho, de aproximadamente 30km, o rio passa a ter apenas um canal novamente. O trecho apresenta características de um canal que pode ter passado por processos de avulsão, dado a presença de marcas de abandono de canais no sentido de oeste para leste. De acordo com Tooth and Nanson (1999), os processos de avulsão são caracterizados pelo abandono de canais e podem se constituir num fator chave na formação e manutenção de padrões de

canais anastomosados e anabranching. Entretanto, o rio nesse trecho também assume um padrão wandering (na estiagem) e meandrante (na chuva).

Nesse trecho o canal torna-se mais encaixado, possuindo largura de margens plenas (bankfull) de 284m e profundidade média de 5m. Dados de concentração apresentaram-se mais elevados para esta estação, podendo alcançar mais de 100 mg l<sup>-1</sup> em período de chuvas. Embora tenha sido encontrada a predominância de silte nas margens, foi observado que em razão das altas descargas em períodos de chuvas acima das normais, o recuo de margens nesse trecho é evidente, o que aumenta a disponibilidade de sedimentos para a calha fluvial.

A fim de demonstrar o comportamento hidrológico e sedimentológico da área de estudo, dados de vazão e concentração de sedimentos foram correlacionados conforme figura 7.

Como citado, o rio Jaguaribe nessa área é fortemente regularizado pela Barragem do Castanhão. A partir da análise dos dados de vazão e concentração (figura 7a) é possível dizer que existe baixa correlação entre essas variáveis, de modo que um mesmo padrão de vazões pode estar acompanhado por diferentes valores de concentrações. Tal situação pode estar relacionada aos picos de subida e descida de vazões em épocas de chuva.

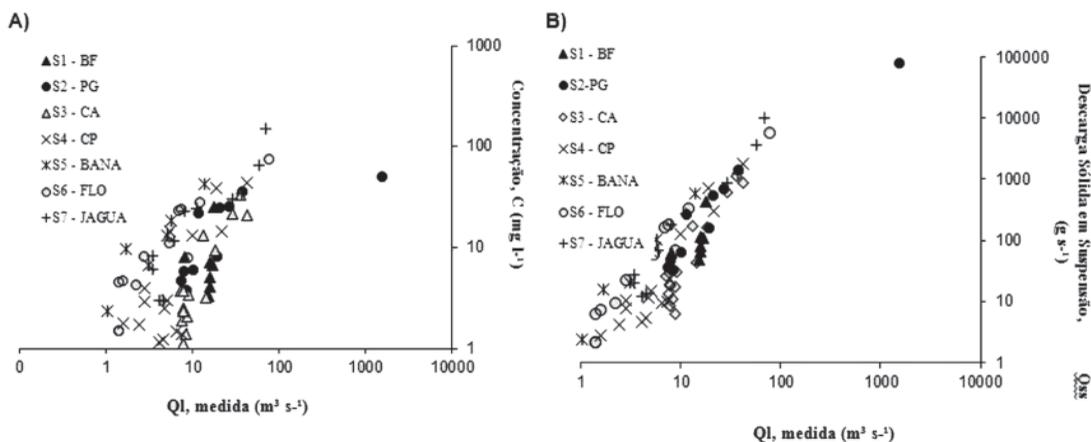


Figura 7 - a) Correlação entre vazão e concentração de sedimentos. b) Correlação entre vazão e Descarga sólida em suspensão. S1 (Barra do Figueiredo); S2 (Peixe Gordo); S3 (Córrego de Areia); S4 (Cabeça Preta); S5 (Banabuiú); S6 (Flores); S7 (Jaguaruana). Fonte: Autor.

Por outro lado, observou-se que quando o rio atinge vazões acima de  $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (em função das chuvas), os valores de concentração aumentam em torno de 5 (cinco) vezes, e a partir daí não crescem de modo significativo, mesmo em vazões mais elevadas. Note que os maiores valores observados foram de  $50 \text{ mg l}^{-1}$  para a mais alta vazão registrada (em Peixe Gordo) e  $150 \text{ mg l}^{-1}$  na estação de Jaguaruana, localizada próxima à foz do rio Jaguaribe.

Em geral, no período de estio as vazões estão abaixo dos  $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e as concentrações abaixo de  $10 \text{ mg l}^{-1}$ . No período de chuva, as vazões podem se elevar para mais de  $1.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  se as comportas da barragem estiverem abertas como ocorreu nos anos de 2008 e 2009, dado registrado para a estação de Peixe Gordo conforme figura 7a. Em períodos de chuvas normais tais valores podem chegar em torno de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  mais próximo à foz.

Tooth (2000) afirma que algumas vezes as taxas de concentrações em rios de áreas secas podem ser elevadas em períodos de grandes fluxos, em razão da presença de margens arenosas (comuns às áreas secas) e da vegetação de baixa sustentação. O autor mostra que concentrações da ordem de 30-50 g l<sup>-1</sup> são comuns, podendo chegar a 100g l<sup>-1</sup>, ou seja, valores extremamente elevados quando comparados aos apresentados neste trabalho. Entretanto, segundo o mesmo autor, concentrações elevadas em algumas áreas podem estar relacionadas ao tipo de sedimento encontrado como a presença de altas taxas de sódio (Na).

A figura 7b correlaciona vazão e descarga sólida em suspensão ( $\text{g s}^{-1}$ ), sendo estas duas variáveis diretamente proporcionais, ou seja, a descarga sólida aumenta com a vazão. Embora para determinar o transporte de sedimento deste rio seja necessário correlacionar dados diários de vazão e sedimento, o que se torna difícil pela ausência de registros históricos de sedimentos, a figura 7b apresenta uma noção da descarga sólida em suspensão nesta área. Os maiores registros observados foram de  $78.000 \text{ g s}^{-1}$  para a estação de Peixe Gordo, onde também foi registrada a maior vazão. De acordo

com o período analisado, em períodos de chuvas normais a descarga sólida pode variar entre  $200 \text{ g s}^{-1}$  e  $1.800 \text{ g s}^{-1}$ .

Entre os trechos analisados, o quarto representa àquele com a maior capacidade de transporte haja vista evidenciar maiores taxas de concentração e vazão. O trecho 3 (três), que envolve dois canais com regimes diferenciados, a descarga sólida pode ser mais expressiva no braço esquerdo, que detém menor granulometria e margens menos conservadas. Os trechos 1 e 2, cujos valores de concentração foram menores, também podem experimentar altas descargas sólidas em função de altas vazões.

## Conclusões

Diante dos avanços na Geomorfologia Fluvial, a discussão sobre os ambientes fluviais semiáridos vem ganhando força, embora ainda concentrados na Austrália e América do Norte. No debate, estudos sobre padrões de canais vêm sendo retomados a partir de uma análise mais profunda sobre os ajustes realizados pelos rios frente às interferências impostas pelos usos da sociedade.

As características que relacionam perfil longitudinal, seção transversal e granulometria de margens e fundo de canal, sugerem que grande parte do canal do médio-baixo Jaguaribe assumam um padrão composto que pode variar, sazonalmente, de wandering a entrelaçado. Porém, ainda é necessário investigar outras variáveis que relacionem distribuição e frequência dos fluxos, associados aos estudos de energia dos canais.

O perfil longitudinal do rio Jaguaribe mostra-se suave, estando mais próximo do modelo convexo, típico de áreas semiáridas. Por outro lado, acredita-se que a sequência de barramentos possa influenciar no modelado do perfil apresentado. No caso das interferências das passagens molhadas, é possível que estas possam provocar alterações no perfil longitudinal quando concentradas espacialmente. Entretanto, é preciso correlacionar dados quanto às características de fundo

e margens, vazão e sedimento, bem como posição no perfil longitudinal para traçar uma avaliação mais precisa.

Do ponto de vista dos dados de concentração de sedimentos, verifica-se que quando comparados aos de outras regiões semiáridas, parecem estar abaixo dos demais, inclusive os observados no período de maiores vazões, fato que também pode estar relacionado aos barramentos, sendo necessário realizar maiores investigações.

No caso de áreas semiáridas com barramentos, o problema em conhecer melhor o funcionamento dos ambientes fluviais reside justamente na carência de dados pretéritos à implantação das barragens que, apesar de se constituir numa prática antiga no Nordeste Brasileiro, devido às necessidades de abastecimento, são poucos os dados históricos (hidrológicos e sedimentológicos) encontrados nessa área. Por essa razão, a construção de um banco de dados é de fundamental importância para melhor subsidiar a pesquisa. E não obstante, que venha a subsidiar o ordenamento territorial e ambiental.

Embora ainda apresentando muitas lacunas no âmbito do entendimento dos processos fluviais em áreas semiáridas, este trabalho espera contribuir nas discussões sobre dinâmica de rios no Ceará e no Nordeste Brasileiro.

## Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior–CAPES pela concessão de bolsa. Ao conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico–CNPq, pelo apoio através do Projeto: O Contexto Hidrossedimentológico no Baixo Vale do Rio Jaguaribe-Ce: implicações para a gestão integrada dos recursos hídricos. Ao Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica – LGCO/UECE pelo apoio de suas instalações para a realização das análises, de uso dos equipamentos e pessoal nos trabalhos de campo.

## Referências Bibliográficas

AB’SÁBER, A.N. Os Domínios de Natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editora, 2003. 159p.

BARTLEY, R.; HAWDON, A.; POST, D.A.; ROTH, C.H. A Sediment Budget for a Grazed Semi-Arid Catchment in the Burdekin basin, Australia. *Geomorphology*, v. 87, p.302-321, 2007.

BRANDT, S. Anders. Classification of Geomorphological effects downstream of Dams. *Catena*, v. 40, p.375 – 401, 2000.

CAMPOS, N.B. A Gestão das Águas e o Desenvolvimento do Estado do Ceará: uma perspectiva histórica. T&C Amazônia, v.9, p.25-31, 2006.

CARLING, P.A.; PETTS, G.E. Lowland floodplain rivers: geomorphological perspectives. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1992. 302p.

CARSON, M.A. The meandering-braided threshold: a reappraisal. *Journal of Hydrology*, v. 73, p. 315–334, 1984.

CARVALHO, N.O. Hidrossedimentologia Prática. 2ª ed., rev., atual. e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CAVALCANTE, A.A. Aspectos da Produção de Sedimentos e seus Efeitos na Gestão dos Recursos no Baixo Vale do Rio Jaguaribe. Fortaleza: UECE, 2001. 143p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2001.

CHARLTON, R. Fundamentals of Fluvial Geomorphology. New York: Routledge, 2008. 234p.

CHRITOFOLETTI, A. Geomorfologia Fluvial. São Paulo: Edgard Blucher, 1981. 312p.

CUNHA, S. B. Impactos das Obras de Engenharia Sobre o Ambiente Biofísico da Bacia do Rio São João (Rio de Janeiro – Brasil). Rio de Janeiro: Ed: Instituto de Geociências, UFRJ, 1995a. 378 p.

CUNHA, S. B. Geomorfologia Fluvial. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (orgs.) Geomorfologia: uma Atualização de Base e Conceitos. 4ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 211-252, 1995b.

GLEICK, P.H. Water in Crisis: A Guide to the World’s Fresh Water Resources. Oxford: Univ. Press, Oxford, xxivq, 1993. 473 p.

GRAF, W. Fluvial Processes in Dryland Rivers. New Jersey: The Blackburn Press, 1988. 346p.

GREGORY, K.J.; PARK, C. Adjustment of River Channel Capacity Downstream From a Reservoir. *Water Resources Research*, vol. 10, nº 4, p.870-873, 1974.

GREGORY, K.J.; WALLING, D.E. Drainage basin form and process: A geomorphological approach. London: Arnold, 1973. 456p.

KNIGHTON, D. Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. London: Arnold, 1998. 383p.

KNIGHTON, D.; NANSON, G. Anastomosis and the continuum of channel pattern. *Earth surface Processes and Landforms*, v.18, p.613–625, 1993.

LATRUBESSE, E.M. Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers. *Geomorphology*, v.101, p.130-145, 2008.

LATRUBESSE, E.M.; STEVAUX, J.C.; SINHÁ, R. Tropical Rivers. *Geomorphology*, v.70, p.187–206, 2005.

LEOPOLD, Luna B. River Channel Change with Time – An Example. *Geological Society of America Bulletin*, v.84, p.1845-1860, 1973.

- LEOPOLD, Luna B.; BULL, W.B. Base Level, Aggradation and Grade. American Philosophical Society Proceedings, v.123, nº3, p.168-202, 1979.
- LEOPOLD, Luna B.; WOLMAN, M.G. River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight, U.S. Geological Survey Professional Paper, 282-B, 1957. 51p.
- LEOPOLD, Luna B.; WOLMAN, M.Gordon; MILLER, John P. Fluvial Processes in Geomorphology. S. Chand & Company LTD. Ram Nagar, New Delhi-55, 1964.
- MACKIN, J. H. Concept of the Graded River. Bulletin of the Geological Society of America, v. 59, p. 463-512, 1948.
- NANSON, G.C.; CROKE, J.C. A Genetic Classification of Floodplains. Geomorphology, v.4, p.459-486, 1992.
- NANSON, G.C.; TOOTH, S.; KNIGHTON, A.D. A Global Perspective on Dryland Rivers: Perceptions, Misconceptions and Distinctions. In: BULL, L.J. and KIRKBY, M.J. Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels. England: John Wiley & Sons, Ltd. p.17-54, 2002.
- RIBEIRO, M.B. Águas Subterrâneas, Açudes e Revitalização. In: ALVES FILHO, J. (Org.). Toda a Verdade sobre a Transposição do rio São Francisco. Rio de Janeiro: Mauad X, 2008. p. 59-90.
- RICHARDS, K.S. Rivers: Form and Process in Alluvial Channels. London: Methuen, 1982. 361p.
- SCHUMM, S.A. The effect of sediment characteristics on erosion and deposition in ephemeral stream channels. US Geological Survey Professional Paper, 352-C, p.31-70, 1961.
- SCHUMM, S.A. The Fluvial System. New York: Wiley, 1977. 338p.
- THOMS, M.C.; WALKER, K.F. Channel changes associated with two adjacent weirs on a regulated lowland alluvial river. Regulated rivers: Res. Manage. v.8, p.271-284, 1993.
- TOOTH, S. Process, form and change in dryland rivers: a review of recent research. Earth-Science Reviews, v.51, p.67-107, 2000.
- TOOTH, S.; NANSON, G. C. Anabranching Rivers on the Northern Plains of arid central Australia. Geomorphology, v.29, p.211-233, 1999.
- WIEGAND, M. C. Proposta Metodológica para Estimativa da Produção de Sedimentos em Grandes Bacias Hidrográficas: estudo de caso Alto Jaguaribe, CE. Fortaleza: UFC, 2009. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- XU, J. Wandering braided river channel pattern developed under quasi-equilibrium: an example from the Hanjiang River, China. Journal of Hydrology, v.181, p. 85-103, 1996.