

Mudanças morfológicas na seção transversal de um rio com alta açudagem: estudo de caso no rio Jaguaribe no município de Quixeré - Ceará

Morphological changes using cross-sectional studies in a semi-arid highly dammed river: a case study on the Jaguaribe river in the municipality of Quixeré - Ceará

José Hamilton Ribeiro Andrade

Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil

hamilton.meioambiente@yahoo.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4576-0655>

Oscar Vicente Quinonez Fernandez

Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, PR, Brasil.

oscar.fernandez@unioeste.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0043-6918>

RESUMO

Os rios são um dos agentes geomorfológicos que mais deixam marcas nas paisagens naturais, apresentando uma dinâmica de produção, transporte e deposição de sedimentos. A seção transversal, o traçado e a declividade do canal são características do canal fluvial que se modificam em intervalo de tempo muito curto, podendo essas mudanças serem naturais ou antrópicas. O presente estudo foi realizado no rio Jaguaribe, um dos principais cursos fluviais intermitentes do Ceará, cuja vazão é perenizada pelo açude do Castanhão. O objetivo do trabalho é comparar a magnitude das vazões com as mudanças morfológicas na seção transversal da Estação Fluviométrica de Quixeré (período 2006-2019). Para tanto foram determinados o tempo de retorno e a probabilidade de ocorrência das vazões máximas anuais pelas fórmulas de Weibull. O estudo da variação morfológicas na seção transversal se deu a partir da análise de perfis topográficos empregando os parâmetros estatísticos de Olson-Rutz e Marlow (1992). Os resultados mostraram que a área da seção transversal, num período caracterizado por vazões altas (2008-2009) e vazões baixas (2016-2019), variou em torno de um valor médio (1.484 m²) caracterizando uma condição de equilíbrio. Os parâmetros estatísticos evidenciaram que a área da seção transversal, modificada pela soma da erosão e da deposição durante as vazões altas ou baixas, variou em porcentagens muito similares. Por outro lado, a magnitude do processo erosivo ou deposicional predominante foi maior nos períodos com vazões altas do que épocas com vazões baixas.

Palavras-chave: Dinâmica fluvial, Erosão de margens, Rio Jaguaribe.

ABSTRACT

Rivers are one of the geomorphological agents that most leave their mark on natural landscapes, presenting a dynamic of production, transport and deposition of sediments. The cross-section, the layout and the slope of the channel are characteristics of the fluvial channel that change in a very short time, and these changes may be natural or anthropic. The present study was carried out on the Jaguaribe River, one of the main intermittent river courses in Ceará state, Brazil, whose flow is perpetuated by the Castanhão dam. The objective of this work is to compare the magnitude of the flows with the morphological changes in the cross section of the fluviometric station of Quixeré (period 2006-2019). For that, the return time and the probability of occurrence of the maximum annual flows were determined by Weibull formulas. The study of morphological variation in the cross-section was based on the analysis of topographic profiles using the statistical parameters of Olson-Rutz and Marlow (1992). The results showed that the cross-sectional area, in a period characterized by high flows (2008-2009) and low flows (2016-2019), varied around an average value (1,484 m²), characterizing a condition of equilibrium. Statistical parameters showed that the cross-sectional area, modified by the sum of erosion and deposition during high or low flows, varied in very similar percentages. On the other hand, the magnitude of the predominant erosive or depositional process was greater in periods with high flows than periods with low flows.

Keywords: River dynamics, Bank erosion, Jaguaribe river.

1. INTRODUÇÃO

A morfologia do canal ajusta-se em escalas temporais que variam de curto, médio e longo prazos, às mudanças das vazões líquida e sólida para manter o equilíbrio dinâmico. A seção transversal, o traçado e a declividade do canal são características do canal fluvial que podem ser alteradas num curto prazo (horas a dias) pela ocorrência de eventos hidrológicos extremos. Os ajustes a médio prazo são causados pela atividade antrópica que pode ser direta (retificação do canal, construção de barragens, irrigação) ou indireta (mudanças no uso da terra). Os fatores climáticos, hidrológicos e tectônicos originam a longo prazo ajustes graduais e progressivos na geometria dos canais fluviais para alcançar um equilíbrio dinâmico (GARCÍA, 1999).

Os processos fluviais em ambientes semiáridos e sub-úmidos são diferentes dos que ocorrem em ambientes úmidos. Essa diferenciação é o resultado da discrepância dos *inputs* de energia no sistema, em espacial da precipitação, gerando diferenciação das formas e estruturas no sistema (SOUZA; ALMEIDA, 2015). Nas regiões semiáridas, a variabilidade da vazão é bastante ampla comparando com as regiões úmidas (McMAHON, 1979) e as cheias extremas nestas regiões podem acarretar processos de erosão e deposição de grande magnitude (DUNKERLEY, 1992).

O represamento ou ačudagem das águas é a intervenção direta mais frequente nos rios das regiões semiáridas (CORRÊA, 2011) e influência nos processos geomórficos no curto e médio prazo gerando alterações na morfologia do canal fluvial, no decréscimo na magnitude das cheias e na redução da descarga sólida (GREGORY; PARK, 1974; PETTS; LEWIN, 1979; PETTS, 1979; ERSKINE, 1985; BRANDT, 2000). No Nordeste brasileiro, as barragens causam significativos impactos no regime hidrológico que modifica os processos erosivos e deposicionais (CAVALCANTE, 2012, 2018a; MAIA, 2016) e afetam a qualidade físico-química da água e a estrutura dos ecossistemas locais (MARINS *et al.*, 2003).

Um exemplo de rios no Nordeste brasileiro que apresenta mudanças na sua dinâmica hidro-sedimentológica ocasionada por barragens é o rio Jaguaribe, um dos mais importantes do estado do Ceará. A vazão deste rio é regularizada por uma rede de reservatórios de pequeno, médio e grande porte que somam ao todo 46 unidades, dentre os quais se destacam os açudes Banabuiú, Orós e Castanhão (ANA, 2017). Os estudos da dinâmica fluvial em uma bacia com forte ačudagem como é a do Jaguaribe tem aumentado gradativamente nas últimas duas décadas. Destacamos os trabalhos de Cavalcante (2001, 2012, 2018 a e b), Bezerra (2010), Cavalcante; Cunha (2011, 2012), Andrade (2016); Queiroz *et al.* (2018) e Coelho; Andrade (2020).

O objetivo deste trabalho é analisar as mudanças morfológicas na área da seção transversal do rio Jaguaribe na Estação Fluviométrica de Quixeré (CE) e relacionar essas alterações morfológicas com as vazões regularizadas pela rede de reservatórios instalada à montante da estação.

1.1. Caracterização da área de estudo

O semiárido nordestino Brasileiro abrange uma área de aproximadamente 969.589,4 km², representando cerca de 60% da região Nordeste e 11,34% do território nacional (CAVALCANTE; CUNHA, 2012). Essa região apresenta como fator de destaque o seu clima, responsável pela variação dos outros elementos que compõem as paisagens. Ao clima estão adaptados a vegetação e os processos de formação do relevo. Já os solos são, em geral, pouco desenvolvidos em função das condições de escassez das chuvas, predominando os processos de intemperismo físico (ARAÚJO, 2011).

O semiárido nordestino é uma região caracterizada pela sazonalidade da precipitação e pela alta variabilidade das chuvas, esse comportamento influencia diretamente na dinâmica fluvial, em alguns anos as chuvas são muito reduzidas (fenômeno das secas) diminuindo consideravelmente a oferta hídrica (CAVALCANTE; CUNHA, 2012; ZANELLA, 2014).

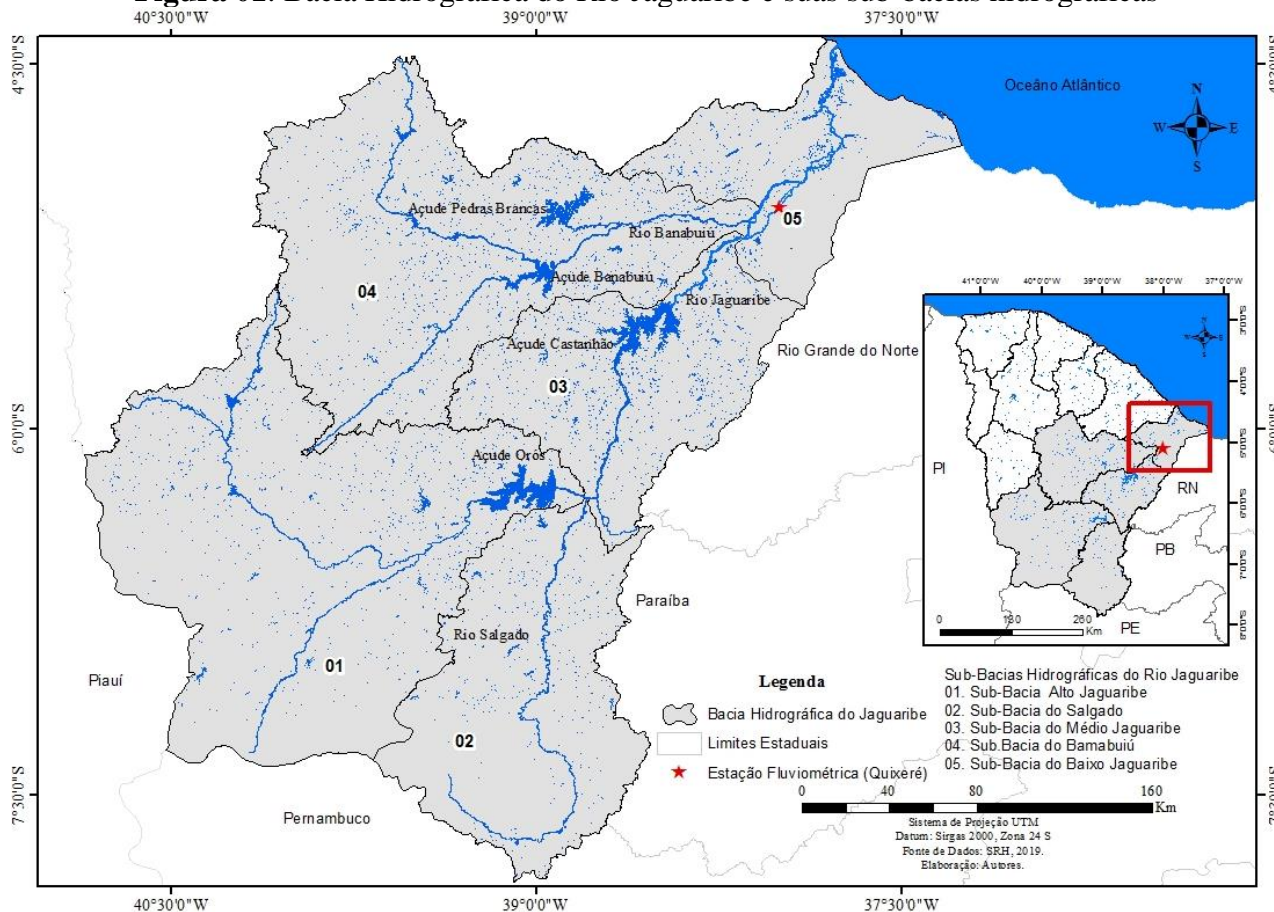
Segundo Malvezzi (2007), a pluviosidade da região semiárida do Nordeste brasileiro é, em média, 750 mm/ano variando de 250 a 800 mm/ano. É o semiárido mais populoso do mundo, atenuando pressões sobre os sistemas ambientais da região. O subsolo é constituído em 70% por rochas cristalinas, o que dificulta a formação de mananciais perenes.

Os rios dessa região são na sua grande maioria intermitentes e apresentam fluxo superficial somente nos períodos chuvosos, ao passo que no período de estiagem, parecem se extinguir, mas estão submersos nos aluviões dos vales ou baixadas, compondo o lençol freático (ARAÚJO, 2011).

Segundo Ab'Sáber (2003), a hidrologia regional do Nordeste seco é particular e influenciada totalmente pelo ritmo climático sazonal, que predomina no espaço fisiográficos dos sertões. Boa parte dos rios dessa região no período de estiagem secam desde suas nascentes até próximo à costa, apresentam alta variabilidade de descarga influenciada pela dinâmica das chuvas, em geral concentradas e mal distribuídas.

O rio Jaguaribe com uma extensão de aproximadamente 610 km, situado no estado do Ceará, corta vários municípios cearenses, sua bacia hidrográfica corresponde a quase 50% do território cearense e é dividida em cinco sub-bacias, sendo elas: Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Salgado e Banabuiú (**Figura 01**).

Figura 01: Bacia Hidrográfica do Rio Jaguaribe e suas sub-bacias hidrográficas



Fonte: elaborado pelos autores.

Conforme Cavalcante (2012), o rio Jaguaribe no médio-baixo curso, a largura de planície aluvial ativa pode alcançar 450 m, sendo comum a formação de bancos de areia decorrente do elevado volume de sedimentos de fundo que são transportados nos períodos chuvosos. Estas condições de transporte dos sedimentos e grande variação da vazão, confere ao rio Jaguaribe um padrão composto, ou seja, padrão *wandering* nos períodos de estiagens, e entrelaçado (*braided*) nas épocas de chuva (**Figura 02**).

Figura 02: Mudanças no padrão fluvial no trecho médio-baixo do rio Jaguaribe tanto no período chuvoso (entrelaçado) (A) como no período seco (*wandering*) (B)



Fonte: Elaborado pelos autores. Imagem A: Google Earth Pro, 2011; Imagem B: Google Earth Pro, 2019.

O rio Jaguaribe é um rio intermitente, porém pela importância econômica e social que desempenha para algumas regiões do território cearense, passou ao longo do tempo por muitas modificações na sua dinâmica natural, ocasionadas, principalmente pela construção de açudes ao longo do seu curso. A finalidade dessas construções é armazenar água no período de chuvas, para garantir o abastecimento humano e animal, e o desenvolvimento de atividades econômicas durante o ano, principalmente em períodos de estiagem prolongada, através da perenização de alguns trechos do rio Jaguaribe (ANDRADE, 2016).

Dentre os principais reservatórios que existem ao longo da bacia do rio Jaguaribe, destacamos o Açude Orós, situado na Sub-bacia do Alto Jaguaribe, criado em 1961 e com capacidade de 1,9 bilhões de metros cúbicos, e o Açude Castanhão localizado no médio curso do rio, criado em 2003, com capacidade de 6,7 bilhões de metros cúbicos, sendo responsável pelo abastecimento da

capital cearense e de sua região metropolitana, através do Canal da Integração e do Canal do Trabalhador (COGERH, 2020).

Para avaliar as mudanças morfológicas do trecho do rio do Jaguaribe, foram utilizados os dados da Estação Fluviométrica de Quixeré (Código 36615000) em operação desde 2005, monitorada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). As coordenadas geográficas da estação são: 5° 5' 1,42" S e 37° 59' 53,34" W e situa-se à jusante da ponte sobre o rio Jaguaribe no município de Quixeré (**Figura 03**). A bacia do rio Jaguaribe até a estação totaliza 48.900 km² Vale destacar que a vazão regularizada do Açude Castanhão pereniza a descarga no rio Jaguaribe no seu trecho inferior desde 2004 em 90% do ano, com valores médios variando de 10 a 19 m³/s (CAVALCANTE, 2018b).

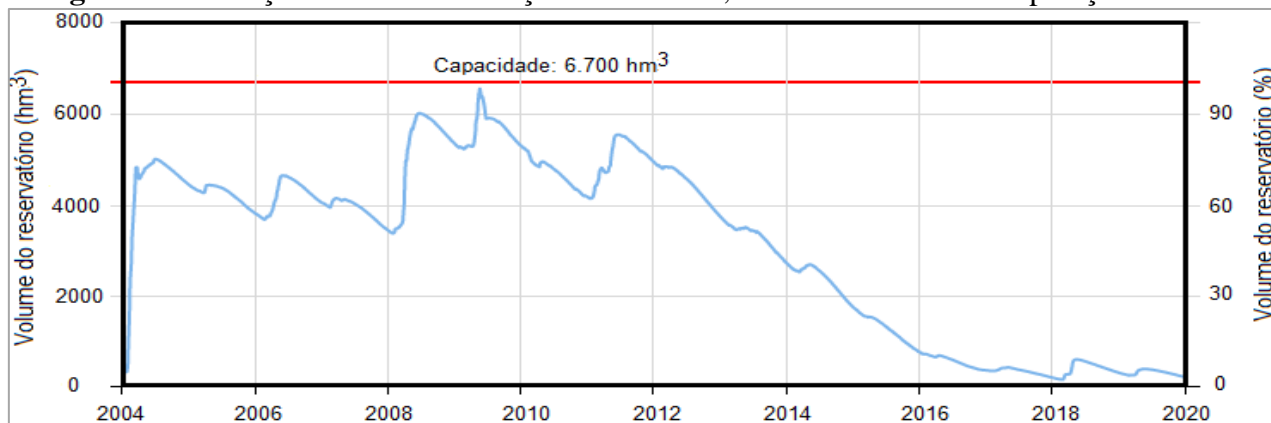
Figura 03: Vista do rio Jaguaribe na estação fluviométrica de Quixeré (CE). Em destaque a ponte na rodovia CE-266 e o balneário na margem esquerda (B). As setas indicam a direção do fluxo



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

No período estudado (2006-2019), as precipitações anuais para a área de estudo e para o estado do Ceará como um todo, conforme a FUNCEME (2020), apresentaram três anos dentro da média (2006, 2018 e 2019), dois anos acima da média histórica (2009-2010) e oito anos de chuvas abaixo da média (2007, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017), sendo seis anos consecutivos de estiagem (2012 - 2017). A longa estiagem contribuiu para a continua redução do volume da água no reservatório do Castanhão (**Figura 04**). Esta situação piorou considerável a partir de 2016, quando as liberações de água para a perenização do rio Jaguaribe foram mínimas, alcançando vazões insignificantes ou nulas na estação de Quixeré.

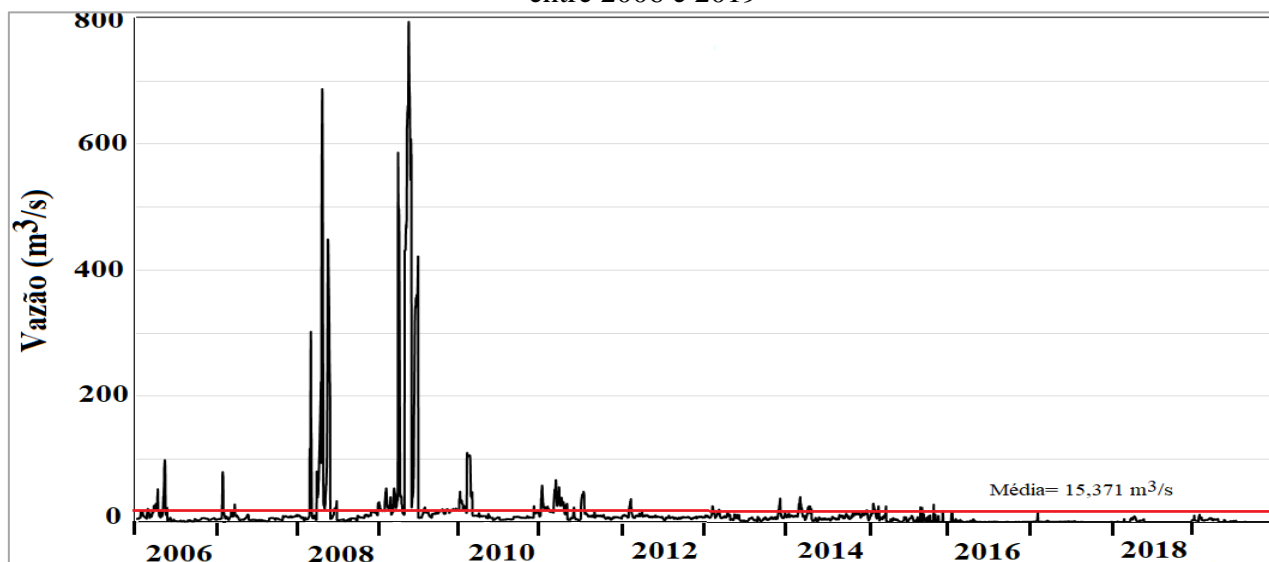
Figura 04: Variação do volume do Açude Castanhão, desde o início de sua operação até 2020



Fonte: Adaptado da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH, 2020.

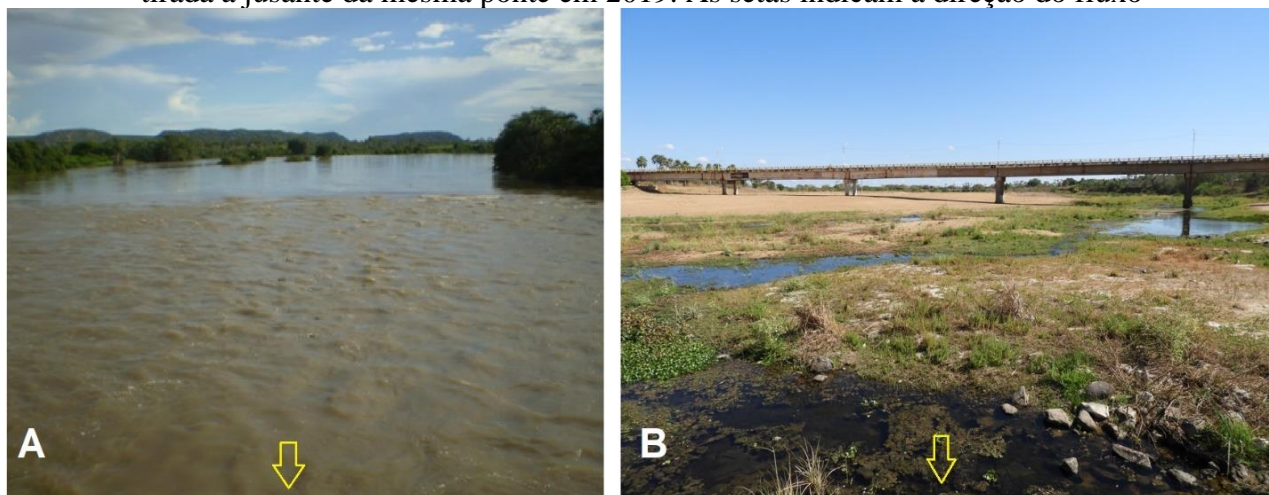
A variação diária da vazão regularizada na estação fluviométrica de Quixeré no período 2006-2019 é mostrada na **Figura 05**. A vazão média interanual para este período foi de $15,371 \text{ m}^3/\text{s}$. As vazões máximas diárias nos períodos chuvosos variaram de $794,76$ a $9,18 \text{ m}^3/\text{s}$ e as vazões mínimas alcançaram valores próximos a zero durante a estação seca (junho a dezembro) nos anos de 2016 a 2019 (**Figura 05**). Os registros fotográficos do canal fluvial no trecho da estação de Quixeré nos anos com maiores e menores vazões diárias, são mostrados na **Figura 6**.

Figura 05: Variação temporal da vazão diária no rio Jaguaribe na estação fluviométrica de Quixeré entre 2006 e 2019



Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA), 2020.

Figura 06: O Jaguaribe entorno da estação fluviométrica de Quixeré nos períodos com vazões máxima e mínima. A) Imagem tirada de cima da ponte na rodovia CE-266 em 2009; e B) Imagem tirada a jusante da mesma ponte em 2019. As setas indicam a direção do fluxo



Fonte: acervo dos autores.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1. Tempo de retorno e probabilidade de ocorrência das vazões máximas anuais

No presente trabalho foi levado em conta o conceito de cheia conforme Min. da Cidade/IPT (2007). As cheias ou enchentes são definidas pela elevação do nível d'água no canal de drenagem

devido ao aumento da vazão, atingindo a cota máxima do canal, porém, sem extravasar. As inundações representam o transbordamento das águas de um curso d'água, atingindo a planície de inundação ou área de várzea.

O tempo de retorno e a probabilidade de ocorrência das vazões máximas anuais (Q_{max}) na estação de Quixeré foram calculadas pelas fórmulas de Weibull (GORDON et al., 1993). Para estimar o tempo de retorno das vazões (T , em anos), os dados da vazão máxima anual foram organizados numa sequência crescente, na qual a maior vazão da série de dados ocupa a primeira posição ($m=1$). O valor de T para cada cheia anual foi estimado empregando a **Equação 01**.

$$T = \frac{n+1}{m} \quad (01)$$

Onde n =número de anos com dados de vazões máximas anuais disponível e m =posição da vazão máxima na ordem crescente.

A probabilidade de ocorrência de uma determinada vazão máxima (P , em %) foi estimada também seguindo a fórmula de Weibull (**Equação 02**).

$$P = \left(\frac{m}{n+1}\right).100 \quad (02)$$

2.2. Parâmetros estatísticos de análise do perfil transversal

O estudo da variação temporal da área da seção transversal no rio Jaguaribe na estação fluviométrica de Quixeré (código 36615000), foi realizado a partir de dados de levantamentos topográficos realizados anualmente pela ANA (2020) entre 2006 e 2019, disponibilizados no portal HidroWeb da Agência Nacional de Águas. Também foram calculadas as estatísticas das vazões diárias medidas na estação de Quixeré, disponível no portal da mesma Agência.

A variação temporal do perfil transversal foi analisada a partir do cálculo da área da seção transversal para cada levantamento e aplicação dos parâmetros estatísticos de Olson-Rutz e Marlow (1992), descritos a seguir.

Variação total da área da seção transversal ($|A\%|$): este parâmetro indica a porcentagem da área total da seção modificada pela erosão e pela deposição (**Equação 03**).

$$|A\%| = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{ant} - Y_{post}|}{\sum_{i=1}^n Y_{ant}} \cdot 100 \quad (03)$$

Onde, Y é a profundidade do canal no i -ésimo ponto medido ao longo da seção transversal a partir de um plano horizontal fixo e n é o total de leituras de profundidade. Os valores de Y_{ant} e Y_{post} representam a profundidade do canal medida a partir do nível referencial nos levantamentos anterior e posterior respectivamente. A comparação só é possível quando a profundidade do canal (Y_{ant} e Y_{post}) é obtido no mesmo ponto da seção transversal. Os valores de $|A\%|$ é interpretada da seguinte maneira: se $|A\%| = 25$, indica que 25% da área da seção foi afetada pela ação acumulada da erosão e da deposição.

Variação residual da área da seção transversal ($\Delta A\%$): este parâmetro indica a processo dominante na seção transversal entre dois levantamentos consecutivos. Este parâmetro é calculado pela **Equação 04**.

$$\Delta A\% = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ant} - Y_{post})}{\sum_{i=1}^n Y_{ant}} \cdot 100 \quad (04)$$

Os valores positivos de $\Delta A\%$ indicam predominância da deposição por cima da erosão e valores negativos sugerem o contrário. Considerando o caso hipotético anterior, quando $|A\%| = 25$ e

se o valor de $\Delta A\% = -5$, indica que 15% da área do perfil foi modificada pela erosão (10 % +5 %) e 10% pela deposição, isto é, a erosão excedeu em 5 % da soma das áreas afetadas pela erosão e pela deposição (20 %).

Os dados de vazões diárias foram analisados estimando as estatísticas básicas das descargas (média, desvio padrão e valores máximo e mínimo) no período compreendido entre os levantamentos considerados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de frequência das vazões máximas anuais (Q_{max}) no período 2006-2019, realizada pelo método de Weibull (**Tabela 01**) indica que a maior vazão Q_{max} ocorrida em 2009, tem um período de retorno de 15 anos e probabilidade de ocorrência de 6,67 %. A magnitude de Q_{max} foi diminuindo a partir de 2010 (**Figura 05**) em razão do forte período de seca que afetou toda região Nordeste naquela década (MARENGO et al., 2016; SÃO JOSÉ et al., 2021). Cavalcante; Cunha (2012) observaram que a implantação do açude Castanhão provocou uma diminuição de 80% nas vazões máximas nas cheias de 2008 a 2010 no trecho inferior no rio Jaguaribe.

A área da seção transversal e os parâmetros estatísticos de Olson-Rutz e Marlow (1992) correspondentes aos perfis transversais levantados anualmente na estação de Quixeré entre 2006 e 2019 são apresentados na **Tabela 02**. A granulometria dos sedimentos de fundo na estação é composta predominantemente pela fração areia (30,8% de grânulos; 20,7% de areia muito grossa, 25,4% de areia grossa e 22 % de areia média) (COELHO; ANDRADE, 2020).

Tabela 01: Tempo de retorno e probabilidade de ocorrência de vazões máximas anuais na estação de Quixeré (período 2006-2019)

Ordem	Ano	Vazão máxima anual (ordem decrescente) (m^3/s)	Tempo de retorno (T) (anos)	Probabilidade (P) (%)
1	2009	794,76	15,00	6,67
2	2008	687,30	7,50	13,33
3	2010	109,83	5,00	20,00
4	2006	98,49	3,75	26,67
5	2007	79,55	3,00	33,33
6	2011	66,81	2,50	40,00
7	2014	39,59	2,14	46,67
8	2013	37,19	1,88	53,33
9	2012	36,57	1,67	56,61
10	2015	29,42	1,50	66,67
11	2017	17,52	1,36	73,33
12	2016	15,53	1,25	80,00
13	2019	11,72	1,15	86,67
14	2018	9,18	1,07	93,33

Fonte: Adaptado da Agência Nacional de Águas (ANA, 2020).

Tabela 02: Variação morfológica da seção transversal e estatísticas da vazão diária na estação de Quixeré entre 2006 e 2019. N=número de dias entre os levantamentos consecutivos. *Nos cálculos dos valores médios foi excluído o levantamento de 2019

Nº	Anos	Datas	Área da seção (m^2)	A %	ΔA %	Processo dominante	Vazão (m^3/s)			
							N	Média	Desvio padrão	Max. e min.
1	2006-2007	15/08/2006 30/07/2007	1489,76 1483,77	1,39	0,46	Deposição	349	5,930	8,37	79,548 e 0,378
2	2007-2008	30/7/2008	1517,72	5,46	-2,39	Erosão	366	39,83	100,57	687,299 e 0,896

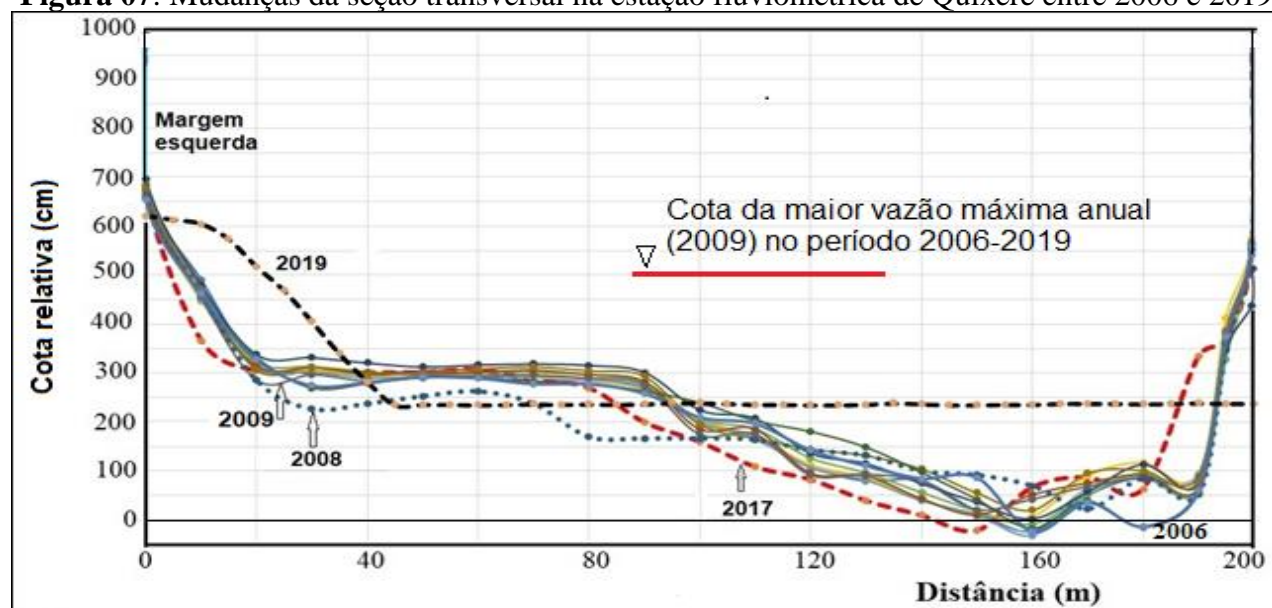
3	2008-2009	11/08/2009	1451,82	5,38	4,36	Deposição	377	89,18	180,07	794,763 e 0,99
4	2009-2010	21/07/2010	1483,77	2,65	-2,09	Erosão	350	18,55	21,050	109,831 e 2,892
5	2010-2011	21/07/2011	1475,78	1,46	0,43	Deposição	374	15,72	13,632	66,805 e 1,941
6	2011-2012	30/07/2012	1459,81	3,83	1,12	Deposição	375	9,679	6,245	44,159 e 2,651
7	2012-2013	02/04/2013	1481,77	3,01	-1,48	Erosão	246	8,110	3,387	25,267 e 3,949
8	2013-2014	14/05/2014	1497,75	1,78	-1,05	Erosão	407	8,129	6,627	39,589 e 0,343
9	2014-2015	03/03/2015	1477,78	1,57	1,33	Deposição	293	8,862	5,240	29,417 e 1,285
10	2015-2016	25/04/2016	1487,77	1,24	-0,74	Erosão	419	2,824	3,971	27,711 e 0
11	2016-2017	21/11/2017	1497,75	5,05	-0,57	Erosão	575	0,399	0,985	17,518 e 0
12	2017-2018	30/08/2018	1485,77	5,73	0,76	Deposição	282	0,906	1,914	9,184 e 0
13	2018-2019	30/10/2019	1380,00	24,99	5,47	Atividade antrópica (terraplanagem)	426	1,233	1,953	11,717 e 0
Med*			1484	3,21	0,14					

Fonte: Autores.

No período de estudo, a vazão do rio apresentou variações que pode ser classificada, *grosso modo*, em três períodos distintos: 2008 a 2009 (vazões altas), 2006 a 2007 e 2010 a 2015 (vazões intermediárias) e 2016 a 2019 (vazões baixas) (**Figura 05**).

Os traçados dos perfis transversais levantados são apresentados na **Figura 07**. A maioria dos perfis apresentaram morfologias similares, mostrando pouca variação topográfica na seção, a exceção dos perfis levantados nos anos de 2006, 2008, 2017 e 2019, quando foram registradas as mudanças mais significativas na geometria da seção, as quais foram destacadas pelos parâmetros estatísticos de Olson-Rutz e Marlow (1992) (**Tabela 02**) e serão comentadas mais adiante.

Figura 07: Mudanças da seção transversal na estação fluviométrica de Quixeré entre 2006 e 2019

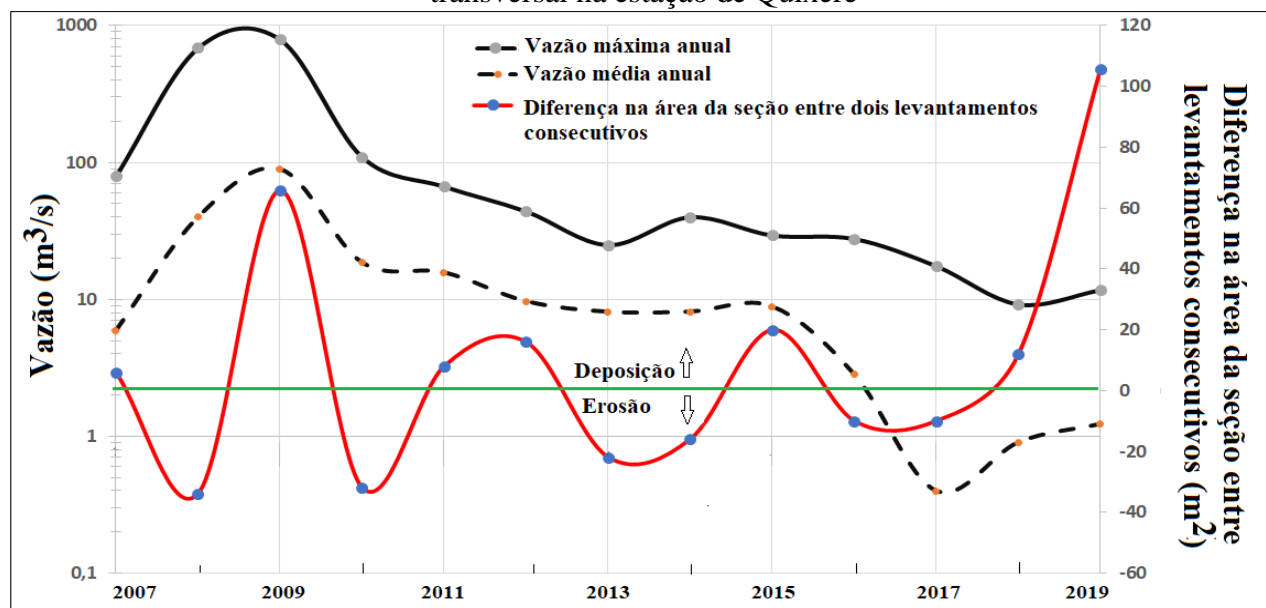


Fonte: Autores.

A comparação entre a vazão e a área da seção transversal é mostrada na **Figura 08**. Nesta figura pode ser apreciado que em cada um desses períodos predominam processos erosivos e

deposicionais no canal fluvial: nos anos com altas vazões foi registrado erosão (2008) e deposição (2009); nos anos com vazões intermediárias foi registrado deposição em 2011 e 2012 e erosão em 2013 e 2014 e nos anos com vazões baixas, erosão em 2016 e 2017 e deposição em 2018. Estas comparações indicam que não existe uma relação direta entre o volume das vazões e a ocorrência um determinado processo geomorfológico (erosão ou deposição). Nesta análise não foi incluída a área do perfil levantado em 2019, em razão das obras de terraplanagem executadas pela Prefeitura de Quixeré nas proximidades da estação fluviométrica (**Figura 03 B**). A obra visou a ampliação da área de lazer do principal balneário do município.

Figura 08: Comparação entre as vazões (média e máxima anual) do rio Jaguaribe e a área da seção transversal na estação de Quixeré



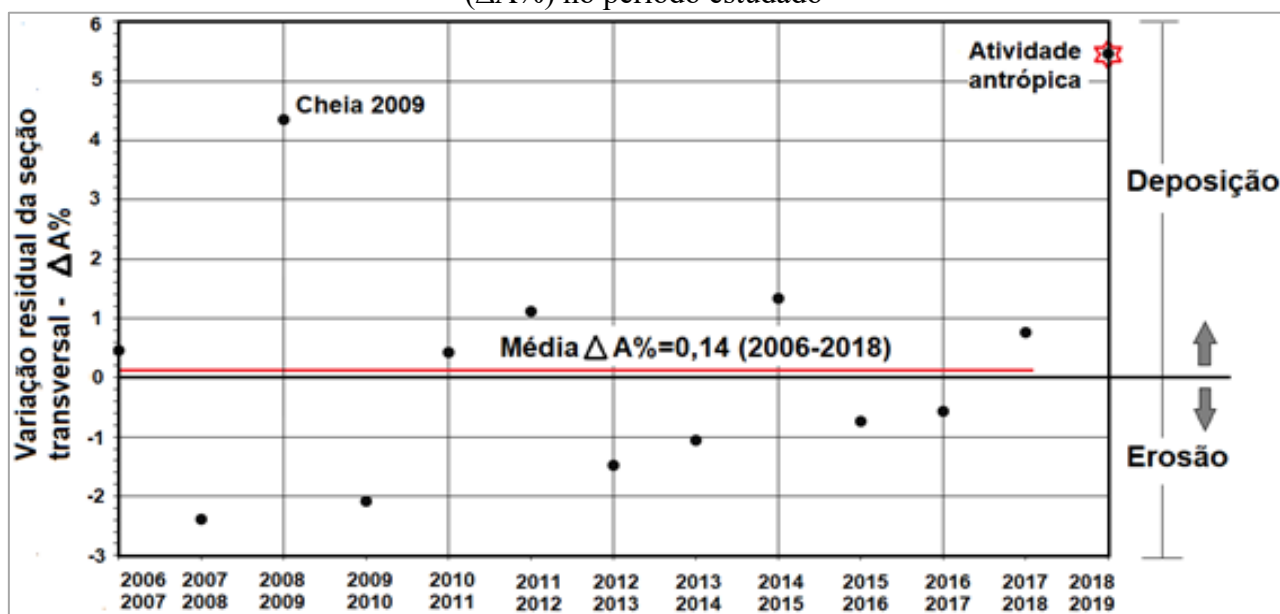
Fonte: acervo dos autores.

A análise dos parâmetros estatísticos de Olson-Rutz e Marlow (1992) nos oferece um profundo detalhamento das mudanças topográficas no leito do canal entre dois levantamentos consecutivos.

O parâmetro Variação total da área da seção transversal ($|A\%|$) oscilou entre 1,24 e 5,73% com média de 3,21 %, tanto nas épocas de altas como de baixas vazões (**Tabela 02**), indicando que a área da seção modificada pela soma dos processos de erosão e deposição oscilou entre 1 e 6 % da área da seção aproximadamente, o que evidência estabilidade do leito e das margens. É necessário destacar que os maiores valores de $|A\%|$ foram observados tanto no período com ocorrência de fortes cheias (2008 e 2009) e como em épocas de estiagem extrema (2017 a 2018) (**Tabela 02**). Essa situação de equilíbrio só foi alterada em 2019 com as obras de terraplanagem, quando o valor de $|A\%|$ alcançou 24,99 %.

Por outro lado, o parâmetro Variação residual da área da seção transversal ($\Delta A\%$) fornece com precisão o processo dominante na comparação entre dois perfis transversais. Os valores de $\Delta A\%$ indicaram qual dos processos (erosão ou deposição) dominaram nos períodos com vazões altas, intermediárias e baixas. Foram observados valores diferenciados de $\Delta A\%$ sendo estas maiores nas épocas de vazões altas [$\Delta A\% = -2,39$ (erosão 2007-2008) e $\Delta A\% = 4,36$ (deposição 2008-2009)] e menores nas épocas de vazões baixas [$\Delta A\% = -0,57$ (erosão 2016-2017) e $\Delta A\% = 0,76$ (deposição 2017-2018)] (**Tabela 02 e Figura 09**).

Figura 09: Oscilação dos valores do parâmetro Variação residual da área da seção transversal ($\Delta A\%$) no período estudado



Fonte: Autores.

O valor da soma de $\Delta A\%$ para o período 2006-2018 foi de 0,14, indicando um leve predomínio dos processos deposicionais nesse período (**Figura 09**). Essa somatória dos valores de $\Delta A\%$ muito próximo a zero denota o equilíbrio entre o predomínio dos processos erosivos e deposicionais. Através do emprego dos parâmetros estatísticos de Olson-Rutz e Marlow (1992), Xavier (2021) também observou uma grande variabilidade dos processos erosivos e deposicionais na estação fluviométrica de Caraúbas localizada na bacia do Alto Rio Paraíba (PB) identificando também um ligeiro predomínio dos processos deposicionais.

No geral, os valores de $\Delta A\%$ indicam que a erosão e a deposição se alternaram como processos dominantes tanto nos períodos com altas e baixas vazões. Essa alternância, manteve a geometria da seção num razoável estado de equilíbrio. O perfil de 2007-2008 registrou remoção do leito ($\Delta A\% = -2,39$), num ano caracterizado por uma cheia expressiva, ocorrida após dois anos com baixas vazões (2006-2007). No ano seguinte (2009), quando foi registrada a maior cheia da série de dados, foi constatado um forte assoreamento na estação de Quixeré ($\Delta A\% = 4,36$), reequilibrando o perfil transversal, após a erosão ocorrida em 2008 (**Figura 09**). A forte cheia do ano de 2009 causou assoreamento no canal do Jaguaribe ao longo do seu percurso como foi constatado por Cavalcante (2012, 2018b), Queiroz *et al.* (2018) e Coelho e Andrade (2020) e na bacia do Alto Paraíba (PB) por Xavier (2021). Estas constatações sugerem que o predomínio do assoreamento naquele ano alcançou escala regional.

4. CONCLUSÕES

A comparação entre as mudanças na área do perfil transversal na estação de Quixeré (CE) com as oscilações das vazões no rio Jaguaribe, um rio originalmente intermitente, mas com vazões perenizadas pela alta aqudagem, nos permitem delinear as seguintes conclusões:

- As áreas da seção transversal no período 2006-2019 afetado por vazões altas (2008-2009) e vazões baixas (2016-2019) oscilaram entorno de um valor médio (1484 m²), mostrando que a área da seção apresenta um equilíbrio estável entre processos de erosão e deposição.

- O parâmetro Variação Total da Área da Seção Transversal ($|A\%|$) mostrou que a área da seção transversal afetada pela soma dos processos de erosão e deposição, variou em porcentagens similares tanto em períodos de altas vazões como em épocas de baixas vazões.
- O parâmetro Variação residual da seção transversal ($\Delta A\%$) indicou a magnitude do processo erosivo ou deposicional predominante entre dois levantamentos consecutivos, foi mais expressiva nos períodos de vazões altas do que nas épocas de vazões baixas.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil**: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Hidroweb**: Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: nov. de 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Reservatórios do Semiárido Brasileiro**: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação: Anexo C-Jaguaribe. Brasília: ANA, 131p. 2017.
- ANDRADE, J. H. R. **Dinâmica de margens em rios semiáridos**: aplicações metodológicas no rio Jaguaribe – Ceará – Brasil. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente, Tecnologia e Sociedade), Universidade Federal Rural do Semiárido, 2016.
- ARAÚJO, M. S de. A região semiárida do Nordeste do Brasil: Questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Revista RIOS Eletrônica**, v.5, n. 5, p.91 -98, 2011.
- BEZERRA, M. de B. **Impactos de passagens molhadas na morfodinâmica fluvial do baixo curso do rio Jaguaribe**: uma análise a partir da Barragem das Pedrinhas em Limoeiro do Norte-Ceará. Fortaleza: UECE, 2010. 114p. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2010.
- BRANDT, S. A. Classification of Geomorphological effects downstream of dams. **Catena**, 40, 375 – 401, 2000.
- CAVALCANTE, A. A. **Aspectos da produção de sedimentos e seus efeitos na gestão dos recursos hídricos do baixo vale do rio Jaguaribe-CE**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2001.
- CAVALCANTE, A. A. **Morfodinâmica fluvial em áreas semiáridas**: o rio Jaguaribe à jusante da barragem do Castanhão, CE-Brasil. 228f. Tese (Doutorado em Geografia) Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2012.
- CAVALCANTE, A. A. Geomorfologia fluvial no semiárido brasileiro. **Revista de Geografia (Recife)**, 35 (4), 254-268, 2018a.
- CAVALCANTE, A. A. Distribuição Temporal de Descargas e Alterações Morfológicas em Rios Semiáridos: O Rio Jaguaribe no Ceará, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, 35, 28-36, 2018b.
- CAVALCANTE, A. A.; CUNHA, S. B. Dinâmica Fluvial no Semiárido e Gestão dos Recursos Hídricos: Enfoques sobre a Bacia do Jaguaribe – CE. In: MEDEIROS, C.N. de. **Os recursos hídricos do Ceará**: Integração, gestão e potencialidades. Fortaleza: IPECE. p. 83-112. 2011.

CAVALCANTE, A. A.; CUNHA, S. B. Morfodinâmica fluvial em áreas semiáridas: discutindo o vale do rio Jaguaribe-CE-Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 13 (1), 39-49, 2012.

COELHO, G. K. S.; ANDRADE, J. H. R. Caracterização de feições morfológicas no canal do rio Jaguaribe: trecho Limoeiro do Norte-Quixeré. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 21 (2), 343-363, 2020.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH). Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/>. Acesso em: dez. de 2020.

CORRÊA, A. C. B. Antropogênese e morfogênese sob a ação de eventos climáticos de alta magnitude no semiárido pernambucano: o caso da Bacia do Riacho Salgado. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 12 (3), 25-36, 2011.

DUNKERLEY, D. L. Channel geometry, bed material, and inferred flow conditions in ephemeral stream systems, barrier range, western N.S.W. Australia. **Hydrological Processes**, 6 (4), 417–433. 1992.

ERSKINE, W. D. Downstream geomorphic impact of large dams: the case of Glenbawn Dam, NSW. **Applied Geography**, 5 (3), 195-210, 1985.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). Disponível em: <http://www.funceme.br/>. Acesso em: nov. de 2020.

GARCÍA, C. C. Cambio ambiental y equilibrio dinámico de los cauces. **Revista Papeles de Geografía**, 30, 31-46. 1999.

GORDON, N. D.; McMAHON, T. A.; FINLAYSON, B. L. **Stream hydrology**: an introduction for ecologists. John Wiley & Sons, New York. 1993.

GREGORY, K. J.; PARK, C. Adjustment of river channel capacity downstream from a reservoir adjustment of river channel capacity downstream from a reservoir. **Water Resources Research**, 10, 870–873. 1974.

MAIA, B. M. A. **Condições ambientais e susceptibilidade a riscos de inundações na sub-bacia hidrográfica do rio Figueiredo, Ceará, Brasil**. 156f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Estadual do Ceará. Fortaleza. 2016.

MALVEZZI, R. **Semi-árido**: uma visão holística. Brasília: Confea, 2007.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climánálise**, 4 (1), 49-54. 2016.

MARINS, R. V.; LACERDA, L. D.; ABREU, I. M.; DIAS, F. J. S. Efeitos da aqúdagem no rio Jaguaribe. **Ciência Hoje**, 33, 66-70, 2003.

McMAHON, T. A. Hydrological characteristics of arid zones. *In*: International Association of Hydrological Sciences (Ed.), **The Hydrology of Areas of Low Precipitation, Publication**, nº. 128. IAHS-AISH, Canberra, 105–120. 1979.

MORE. **Mecanismo online para referências, versão 2.0**. Florianópolis: UFSC: Rexlab, 2013. Disponível em: <http://www.more.ufsc.br/>. Acesso em: 06 fev. 2023.

MINISTÉRIO DAS CIDADES/INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS–IPT **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 176 p., 2007.

OLSON-RUTZ, K. L.; MARLOW, C. B. Analysis and interpretation of stream channel cross-sectional data. **North American Journal of Fisheries Management**, 12: 55-61, 1992.

PETTS, G. E. Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. **Progress in Physical Geography**, 3, 329-362, 1979.

PETTS, G. E.; LEWIN, J. Physical effects of reservoir on river systems. *In: Man's Impact on the Hydrological Cycle in the United Kingdom* (G.E. Hollis, ed.), Norwich: Geo Abstracts, pp 79-91, 1979.

QUEIROZ, P. H. B.; PINHEIRO, L. S.; CAVALCANTE, A. A.; TRINDADE, J. M. R. Caracterização multitemporal de barras e ilhas fluviais no baixo curso do rio Jaguaribe, Ceará-Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 19 (1): 169-188, 2018.

SÃO JOSÉ, R. V.; COLTRI, P. P.; GRECO, R.; MELO, H. L. S.; SANTOS, K. A.; SOUZA, I. S. Seca extrema de 2012 no semiárido baiano e seus impactos: informações climáticas difundidas pela mídia. **Revista Brasileira de Climatologia**, 29, 415-439, 2021.

SOUZA, J. O. P. de; ALMEIDA, J. D. M. Processos fluviais em terras secas: uma revisão. **Okara: Geografia em debate**, v.9, n.1, p.108-122, 2015.

XAVIER, P. C. D. S **Análise hidrossedimentológica da bacia do alto rio Paraíba**: uma contribuição à morfodinâmica fluvial em ambientes semiáridos. 160 f. Tese (Doutorado em Geografia) Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2021.

ZANELLA, M. E. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido do Nordeste. **Caderno Prudentino de Geografia**, Volume Espacial, n.35, p.126-142, 2014.



Informações sobre a Licença

Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.

License Information

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which allows for unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, as long as the original work is properly cited.