



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE, TECNOLOGIA E
SOCIEDADE

**DINÂMICA DE MARGENS EM RIOS SEMIÁRIDOS:
APLICAÇÕES METODOLÓGICAS NO RIO JAGUARIBE
– CEARÁ – BRASIL**

JOSÉ HAMILTON RIBEIRO ANDRADE

Mossoró, RN
Janeiro de 2016

JOSÉ HAMILTON RIBEIRO ANDRADE

**DINÂMICA DE MARGENS EM RIOS SEMIÁRIDOS: APLICAÇÕES
METODOLÓGICAS NO RIO JAGUARIBE – CEARÁ – BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus de Mossoró, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

Orientador: Prof. Dr. Celsemy Eleutério Maia - UFERSA

Mossoró, RN
Janeiro de 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
BIBLIOTECA CENTRAL ORLANDO TEXEIRA – CAMPUS MOSSORÓ
Setor de Informação e Referência

A553d Andrade, José Hamilton Ribeiro.

Dinâmica de margens em rios semiáridos: aplicações metodológicas no rio Jaguaribe/ José Hamilton Ribeiro Andrade – Mossoró, 2016.

102f:il.

Orientador: Prof. Dr. Celsemy Eleutério Maia

Dissertação (MESTRADO EM AMBIENTE, TECNOLOGIA E SOCIEDADE) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró – Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação

1. Erosão Pluvial. 2. Rio Jaguaribe. 3. Dinâmica fluvial. I. Título

RN/UFERSA//BOT/045

CDD 631.45

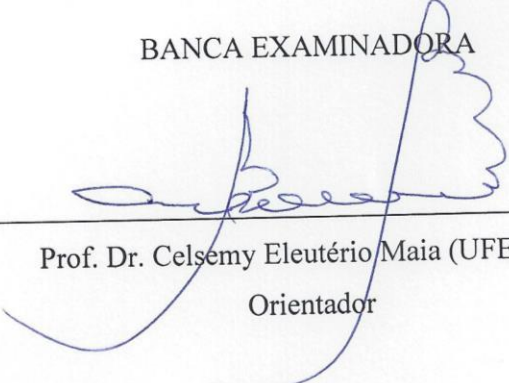
JOSÉ HAMILTON RIBEIRO ANDRADE

**DINÂMICA DE MARGENS EM RIOS SEMIÁRIDOS: APLICAÇÕES
METODOLÓGICAS NO RIO JAGUARIBE – CEARÁ – BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus de Mossoró, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

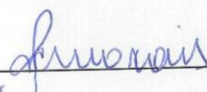
Aprovada em: 27/01/2016

BANCA EXAMINADORA



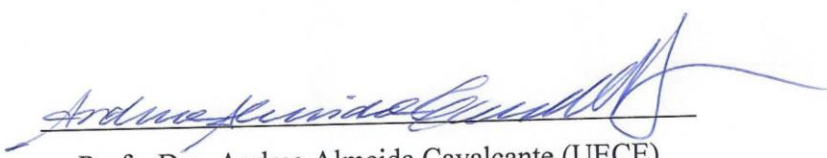
Prof. Dr. Celso Eleutério Maia (UFERSA)

Orientador



Profa. Dra. Elis Regina Costa Moraes (UFERSA)

Membro



Profa. Dra. Andrea Almeida Cavalcante (UECE)

Membro

“Todos os que se iniciam no conhecimento das ciências da natureza – mais cedo ou mais tarde, por um caminho ou por outro – atingem a ideia de que a paisagem é sempre uma herança. Na verdade, ela é uma herança em todo o sentido da palavra: herança de processos fisiográficos e biológicos, e patrimônios coletivo que historicamente as herdaram como território de atuação de suas comunidades.”

(Ab’Saber, 2003)

AGRADECIMENTOS

À Deus, este ser celeste que irradia meus passos neste mundo tão complexo, proporcionando-me momentos indescritíveis e razões para continuar sonhando por uma sociedade mais justa.

À minha família, primeira escola, que sempre apoiou minhas decisões, incentivando e cultivando o amor, o carinho e o respeito sobre as pessoas.

À meu orientador prof. Dr. Celsemy Eleutério Maia, pelo acolhimento, amizade, ensinamentos, compreensões, motivações, entre tantas coisas boas. Muito obrigado pela confiança depositada nas minhas ideias, que justamente com as suas, proporcionaram esta pequena contribuição para a Ciência.

Aos membros da banca examinadora, a profa. Dra. Elis Regina Costa Moraes e a Profa. Andrea Almeida Cavalcante, pela disposição e as relevantes considerações realizadas para concretude deste trabalho.

A todos que formam o Laboratório de Biotecnologia da UFERSA em especial a Maria Valdete da Costa e Danielle Marie Macedo Sousa pelas contribuições na etapa de laboratório.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ambiente, Tecnologia e Sociedade (PPATS) que de forma direta ou indireta deixaram suas marcas nas entrelinhas deste esboço.

Aos meus colegas de curso que compartilharam deste momento de construção do conhecimento científico, em agradecimento especial, reporto-me a Hiara Ruth S. C. Gaudêncio, Jefersson Alves de Moraes, Nadia Cristina Pontes .

Ao professor Oscar Vicente Q. Fernandez pelas várias contribuições técnicas-científicas e pela disponibilidade de contribuir no acervo bibliográfico desta obra.

Ao meu amigo Juranilo Sousa, pelas ajudas impagáveis nas etapas de campo, assim como o carinho e companheirismo depositado a minha pessoa.

Aos meus queridos professores da Faculdade de Filosofia Dom Aurelino Matos (FAFIDAM) em especial a profa. Andrea Almeida Cavalcante que me apresentou a geomorfologia fluvial, e a profa. Érika Gomes Brito que me levou a andar nos caminhos das geotecnologias.

Aos meus amigos que tanto impulsionaram e incentivaram nesta caminhada acadêmica em especial ao Marcos de Brito Bezerra, Francisco de Assis Sousa, Francisco Jonathan de S. C. Nascimento, Francisco Carlos de Oliveira Braga, Sávio Gomes Brito, Stênio Gomes Brito e Natanael da Fonseca Ribeiro.

E finalizando agradeço a Naiara Barreto da Silva (meu amor), que implantou na minha vida novas formas de sonhar, além da compreensão e ajuda nos momentos difíceis desta caminhada.

DINÂMICA DE MARGENS EM RIOS SEMIÁRIDOS: APLICAÇÕES METODOLÓGICAS NO RIO JAGUARIBE – CEARÁ – BRASIL

RESUMO

A erosão das margens de um rio é um fenômeno natural, sendo o mesmo muito dinâmico e passível de ser acelerado pelas atividades humanas. O entendimento da erosão marginal é fundamental, para os estudos relacionados a geomorfologia fluvial, pois além de proporcionar desequilíbrios ambientais, este processo pode acarretar problemas de ordem social e econômica. A maioria dos estudos sobre erosão de margens foram desenvolvidos em rios de regiões temperadas e em rios de pequenas bacias de drenagem, no território brasileiros alguns trabalhos foram realizados na bacia do rio Paraná, em regiões semiáridas, como é o caso da região do Nordeste brasileiros, poucos trabalhos nesta linha foram desenvolvidos. Em rios situados em regiões semiáridos, os processos erosivos são observados com maior magnitude em épocas de chuvas acima da média, o que favorece a ocorrência do nível de margens plenas, contribuindo, para o alargamento do canal. Isto é completamente diferente dos rios localizados em regiões mais úmidas no qual as vazões e precipitações são mais regulares, desta forma o alargamento do rio é mais frequente. O presente estudo tem como objetivo analisar a dinâmica dos processos de erosão de margens no rio Jaguaribe, no seu baixo curso, precisamente no município de Quixeré. O rio Jaguaribe é um dos principais mananciais do Estado do Ceará, o mesmo é um rio semiárido e apresenta suas vazões controladas por açudes. Para isto foram selecionadas ao longo de um trecho de 10 km do rio nove seções que foram agrupadas em três tipos áreas, ou seja, áreas conservadas, áreas parcialmente conservadas e áreas degradadas. Os recuos das margens monitoradas foram acompanhados mensalmente, através do método dos pinos. Também foram coletadas amostras de solo para determinar a densidade de raiz nas margens, além da aplicação de um teste de Infiltração baseado em Maia (2014). Imagens de satélite de 1980 e 2014 foram trabalhadas para verificações dos usos e ocupações do solo na área de estudo, e analisar as mudanças morfológicas do rio. Os resultados obtidos mostram que o volume erodido nas seções monitoradas foi considerado baixo, as áreas degradadas apresentaram maiores volumes erodidos, comparadas as áreas conservadas e parcialmente conservadas. Para o período avaliado (junho/2014 a maio/2015) a principal condicionante responsável pela erosão marginal foram as precipitações, mesmo estas terem ficado abaixo da média histórica. As vazões e a variação do nível do rio não foram determinantes para erosão no período estudado. Entre os usos observados na planície fluvial, as pastagens e agricultura irrigada se destacam, suprimindo a vegetação ciliar que atua na estabilidade das margens. Os principais processos erosivos observados no trecho em estudo foram a erosão laminar das margens, a corrosão, desmoronamento por cisalhamento e o desmoronamento por basculamento. Com isso, verificou-se que a vegetação ciliar contribui fortemente na estabilidade das margens, minimizando os processos erosivos. As baixas taxas erosivas estão relacionadas as reduzidas precipitações ocorridas na área, podendo apresentar volumes bem elevados em anos mais chuvosos e com vazões mais elevadas.

Palavras-Chaves: Dinâmica Fluvial; Erosão de Margens; Rio Jaguaribe.

RIVERBANK DYNAMICS IN SEMIARID RIVERS: METHODOLOGICAL APPLICATIONS ON RIO JAGUARIBE – CEARÁ - BRASIL

ABSTRACT

The erosion of a riverbank is a natural phenomenon, being it very dynamic and capable of being accelerated by human activities. The understanding of riverbank erosion is crucial for studies related to fluvial geomorphology, because this phenomenon causes environmental disturbances, thus it can lead to problems of social and economic order. Most of the studies on riverbanks erosion were developed in temperate regions and in small watersheds of rivers. In Brazilian territory, some work was carried out in the Paraná River basin. In semi-arid regions such as the Northeast Brazil, few studies like these were developed. In rivers located in semi-arid regions, the erosive processes are observed with greater magnitude in above average rainy seasons, which favors the occurrence of the level of full riverbanks, contributing to the widening of the canal. This is quite different from rivers located in more humid regions in which the flow and rainfall are more regular, thus the widening of the river is most common. This study aims to analyze the dynamics of riverbank erosion in the Jaguaribe River, in its lower course, precisely in Quixeré town. The Jaguaribe River is one of the main rivers of Ceará, it is a semiarid river and it has its subsidiaries controlled by dams. For that it have been selected over a stretch of 10 km of the river in nine sections which were grouped into three areas types, that is: preserved areas, partially preserved areas and degraded areas. The setbacks of the monitored riverbanks were followed monthly via the pin method. Also, some soil samples were collected to determine the root density at the riverbanks, besides the application of an Infiltration test based on Maia (2014). Satellite images from 1980 and 2014 were worked for checking the uses and land use in the study area, and to analyze the morphological changes of the river. The results showed that the volume eroded in the sections monitored was considered low, degraded areas have higher volumes eroded, comparing the conserved and partially preserved areas. For the study period (June / 2014 to May / 2015) the main factor responsible for riverbank erosion was the precipitation, even this have been below the historical average. Flow rates and the change in river levels have been not decisive for erosion during the study period. Among the uses observed in the fluvial plains, pastures and irrigated agriculture stand out, suppressing the riparian forest that acts in the stability of the riverbanks. The main erosion observed in the stretch under study has been the laminar riverbank erosion, corrosion, collapse by shearing and the collapse by tipping. With this, it was found that the ciliary vegetation contributes strongly on the stability of riverbanks, minimizing erosion. The low erosive rates are related to reduced rainfall occurred in the area and it may have very high volumes in more rainy years and with higher flow rates.

Keywords: Fluvial dynamics; Riverbank erosion; Jaguaribe River.

LISTA DE ABERVIATURAS

AC	Área Conservada
AD	Área Degradada
ANA	Agência Nacional de Água
APC	Área Parcialmente Conservada
APP	Área de Proteção Permanente
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DRaiz	Densidade de Raiz
FUNCEME	Fundação Cearense de Metodologia e Recursos Hídricos
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégica Econômica do Ceará
P.E50%	Precipitação para Erosão de 50% da Máxima
P.TPEmax	Precipitação na Taxa de Perda de Solo por Erosão Máxima
PDI	Processamento Digital de Imagens
PEmax	Precipitação Máxima na Taxa de Solo
PS	Perda de Solo
PSmax	Perda Máxima de Solo
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRH	Secretaria dos Recursos Hídricos
TGS	Teoria Geral dos Sistemas
TPE	Taxas de Perda de Solo
TPEmax	Taxa Máxima de Perda de Solo por Erosão
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semiárido
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos
Zmax	Profundidade Máxima de Infiltração

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Áreas de Proteção Permanente de acordo com a largura do rio.	46
Tabela 2 – Distribuição absoluta (ha) e porcentagem de redução/ampliação (%) das classes de uso e ocupação do solo no período de 1989-2014.	75
Tabela 3 – Recuo e estado de conservação das margens do rio Jaguaribe entre 1989 – 2014.	78
Tabela 4 – Parâmetros do modelo de regressão (PE _{max} , a e n), coeficiente de determinação, precipitação para erosão de 50% da máxima (P.E50%), precipitação na taxa de perda de solo por erosão máxima (P.TPE _{max}) e taxa máxima de perda de solo por erosão (TPE _{max}) para as áreas avaliadas.	84
Tabela 5 – Recuo anual das áreas monitoradas durante os doze meses de avaliação.	86
Tabela 6 – Densidade de raízes (kg m ⁻³) e infiltração (cm) nas áreas conservadas, parcialmente conservadas e degradadas.	92
Tabela 7 – Teste de média para densidade de raiz (DRaiz) e profundidade de infiltração (Z _{max}).	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do fluxo laminar e fluxo turbulento dentro de um canal fluvial.	26
Figura 2 – Comportamento do lençol freático em áreas de climas mais úmida e de climas mais seco.	27
Figura 3 – Representação dos compartimentos de um rio, ou seja, alto, médio e baixo curso.	30
Figura 4 – Representação dos tipos de leitos fluviais.	32
Figura 5 – Processo de erosão e deposição dentro do canal fluvial.	33
Figura 6 – Desmoronamento por cisalhamento.	36
Figura 7 – Desmoronamento por basculamento.	37
Figura 8 – escorregamento rotacional.	37
Figura 9 – Fluxograma metodológico.	47
Figura 10 – Bacia Hidrográfica do Rio Jaguaribe	49
Figura 11 – Localização da área de estudo.	50
Figura 12 – Área considerada conservada.	52
Figura 13 – Área considerada parcialmente conservada.	53
Figura 14 – Área considerada degradada.	53
Figura 15 – Instalação dos pinos nas margens.	54
Figura 16 – Pino introduzido na margem e com exposição padrão de 10 cm.	55
Figura 17 – Localização das seções de monitoramento do trecho em estudo do rio Jaguaribe.	56
Figura 18 – Monitoramento do recuo dos pinos.	57
Figura 19 – Coleta de solo utilizado o Trado Urland	58
Figura 20 – Garrafa pet e suporte utilizado na aplicação do teste de Infiltração proposto por Maia (2014).	58
Figura 21 – Disposição das garrafas sobre a margem.	59
Figura 22 – Raízes contidas no solo.	60
Figura 23 – Interfase do software Hidro 1.2.	62
Figura 24 – Classificação de imagens e confecção de mapa de uso e ocupação no <i>software</i> Spring 5.3.	64
Figura 25 – Análise da evolução do canal fluvial do rio Jaguaribe em ambiente GIS (<i>Software</i> Arcgis 10.1).	65

Figura 26 – Mapa de Uso e Cobertura Vegetal da área de estudo para o ano de 1989.	73
Figura 27 – Mapa de Uso e Cobertura Vegetal da área de estudo para o ano de 2014.	74
Figura 28 – Morfologia do canal fluvial no trecho entre os anos de 1989 - 2014	77
Figura 29 – Ação do escoamento superficial da água da chuva, formação de voçorocas na margem.	80
Figura 30 – Processo de corrosão da margem.	81
Figura 31 – Processo de desmoronamento por basculamento.	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Variáveis da geometria hidráulica.	31
Quadro 2 – Efeitos benéficos da vegetação herbácea e de gramíneas na preservação da erosão pluvial.	43
Quadro 3 – Efeitos positivos da vegetação na estabilidade de massa de encostas.	43
Quadro 4 – Áreas monitoradas no baixo curso do rio Jaguaribe.	52
Quadro 5 – Quantidade de pinos em cada seção monitorada e altura das margens.	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Média histórica acumulada mensal das precipitações no município de Quixeré e as chuvas acumuladas observadas no período de monitoramento (Julho/2014 e Maio/2015).	66
Gráfico 2 – Vazões e cotas médias mensais do rio Jaguaribe no período de junho de 2014 a maio de 2015	67
Gráfico 3 – Vazões e precipitações mensais para o período de monitoramento.	68
Gráfico 4 – Comportamento das vazões do rio Jaguaribe no município de Tabuleiro do Norte no ano de 1962.	69
Gráfico 5 – Relação do volume do Açude Castanhão e a vazão do rio Jaguaribe no trecho em estudo - 2009.	70
Gráfico 6 – Relação do volume do Açude Castanhão e a vazão do rio Jaguaribe no trecho em estudo – 2014- 2015.	70
Gráfico 7 – Perfil transversal do rio Jaguaribe na Estação Fluviométrica – 36760000 entre os anos de 2005 – 2015.	79
Gráfico 8 – Volume erodido total por mês nas seções monitoradas e a precipitação acumulada para o período monitorado.	82
Gráfico 9 – Comportamento das vazões mensais e o volume total erodido por mês nas áreas monitoradas	83
Gráfico 10 – Erosão acumulada ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$) em função da precipitação (mm) nas áreas conservadas.	84
Gráfico 11 – Erosão acumulada ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$) em função da precipitação (mm) nas áreas parcialmente conservadas.	85
Gráfico 12 – Erosão acumulada ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$) em função da precipitação (mm) nas áreas degradadas.	85
Gráfico 13 – Taxa de perda de solo ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1} \text{mm}^{-1}$) em função da precipitação (mm) nas áreas conservadas.	86
Gráfico 14 – Taxa de perda de solo ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1} \text{mm}^{-1}$) em função da precipitação em função da precipitação (mm) nas áreas parcialmente conservadas.	87
Gráfico 15 – Taxa de perda de solo ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1} \text{mm}^{-1}$) em função da precipitação (mm) em áreas degradadas.	88
Gráfico 16 – Precipitação na taxa de perda de solo por erosão máxima (P.TPEmax) nas áreas conservadas	89

Gráfico 17 – Precipitações na taxa de perda de solo por erosão (P.TPEmax) nas áreas parcialmente conservadas.	89
Gráfico 18 – Precipitações na taxa de perda de solo por erosão (P.TPEmax) nas áreas degradadas.	89
Gráfico 19 – Taxa de perda de solo máximo ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1} \text{mm}^{-1}$) nas áreas conservadas.	90
Gráfico 20 – Taxa de perda de solo máximo ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1} \text{mm}^{-1}$) nas áreas parcialmente conservadas.	91
Gráfico 21 – Taxa de perda de solo máximo ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1} \text{mm}^{-1}$) nas áreas degradadas.	91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVOS GERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3 REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1 ANÁLISE SISTÊMICA E OS ESTUDOS FLUVIAIS	21
3.2 DINÂMICA FLUVIAL	25
3.3 CANAIS FLUVIAIS	30
3.4 EROSÃO DE MARGENS FLUVIAIS	34
3.4.1 Estabilidade de margens fluviais	37
3.5 MONITORAMENTO DA EROSÃO DE MARGENS	39
3.6 VEGETAÇÃO CILIAR E SUA RELAÇÃO COM OS CANAIS FLUVIAIS	41
3.6.1 Área de Proteção Permanente (APP)	45
4 MATERIAL E MÉTODOS	47
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	47
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	48
4.3 ETAPA DE CAMPO	51
4.3.1 Escolha das Margens	51
4.3.2 Instrumentação das Margens	54
4.3.3 Monitoramento dos Processos Erosivos	57
4.3.4 Coleta de Solo	57
4.3.5 Índice de Infiltração	58
4.4 ETAPA DE LABORATÓRIO	59

4.5 ETAPA DE GABINETE	60
4.5.1 Determinação da Taxa de Erosão e o Volume Erodido	60
4.5.2 Densidade de Raízes e Índice de Infiltração	61
4.5.3 Dados Pluviométricos e Fluviométricos	61
4.5.4 Análise Estatísticas dos Dados	62
4.6 SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO	63
4.6.1 Análise Multitemporal do Uso e Ocupação do Solo	63
4.6.2 Análise Multitemporal da Dinâmica do Canal Fluvial	65
5 RESULTADOS E DISCURSÕES	66
5.1 FATORES CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS	66
5.2 USO E MAPEAMENTO DA COBERTURA DO SOLO	71
5.3 MUDANÇAS MORFOLÓGICAS DO CANAL FLUVIAL NO PERÍODO DE 1989 – 2014	76
5.4 PROCESSOS EROSIVOS	80
5.5 MAGNITUDE DA EROÇÃO	82
5.6 A VEGETAÇÃO CILIAR E OS PROCESSOS DE EROÇÃO DE MARGENS	92
CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

Os ambientes fluviais são muito dinâmicos com alterações constantes nos seus mecanismos de produção, transporte e deposição de sedimentos. Isto desperta o interesse de entender tais processos, pois ao longo da história das sociedades humanas, estes espaços foram e continuam sendo a base para a fixação das cidades e um meio de desenvolvimento econômico, sendo ambientes cobiçados por apresentarem os requisitos básicos para sobrevivência humana, disponibilizando água em abundância e solos férteis.

A inclusão das atividades humanas nestes espaços ao longo do tempo tem contribuído para metamorfosear suas paisagens, além de romper com o equilíbrio ambiental. O desmatamento da vegetação ciliar, assim como as grandes obras de engenharia são algumas destas atividades que comprometem o fluxo de matéria e energia nos ambientes fluviais.

Segundo Cunha e Guerra (2011), os processos naturais como a formação do solo, lixiviação, erosão, deslizamentos, mudanças no comportamento da cobertura vegetal, alterações hidrológicas, entre outros ocorrem no ambiente natural, sem a necessidade da intervenção humana. Porém quando o homem modifica estes processos, ditos naturais, os mesmos são intensificados de forma descontrolada, e suas consequências trazem sérios prejuízos para as sociedades humanas.

Dentre os diversos processos atuantes nos ambientes fluviais, destacamos a erosão de margens, sendo o mesmo um processo muito dinâmico e passível de ser acelerado pelas ações humanas. Fernandez (1990), define a erosão marginal como sendo o recuo linear das margens, devido à remoção dos materiais do barranco pela ação fluvial (correntes, ondas) ou por forças de origem externa (precipitação).

A erosão de margens é fundamental para os estudos relacionados a geomorfologia fluvial, pois este processo desencadeia diversas mudanças no canal fluvial e atua no desenvolvimento da planície de inundação. Diante de sua dinamicidade, os processos de recuo de margens devem ser compreendidos, a fim de possibilitar um planejamento adequado quanto ao uso das margens (HOOKE, 1979).

Os processos de erosão de margens é um fenômeno natural, porém quando o mesmo é alterado por alguma atividade humana, seus problemas e consequências são vários, pois, além de proporcionar alterações na dinâmica fluvial dos rios, a erosão de margens em processos acelerados, pode contribuir de forma mais veemente na ocorrência

de problemas de ordem social e econômico, afetando direta ou indiretamente as populações que habitam as adjacências dos rios.

Conforme Hooke (1979), os primeiros estudos realizados sobre erosão de margens foram desenvolvidos nos rios da Grã-Bretanha. Neste contexto, Rocha e Souza Filho (2008) reforçam que a maioria dos estudos sobre erosão de margens foram desenvolvidos em rios de regiões temperadas e em rios de pequenas bacias de drenagem.

No território brasileiro ainda são poucos os trabalhos desenvolvidos sobre tal temática. Porém a maioria dos estudos sobre erosão de margens, concentram-se, na bacia do rio Paraná (PR). Trabalhos que focalizem a dinâmica de margens nos rios da região semiárida do Nordeste brasileiro, até o momento, ainda são poucos, apesar da necessidade da compreensão de tais processos e da importância dos rios para esta região.

O comportamento da erosão de margens é muito variável, podendo ser relacionado ao tipo climático no qual está inserida a bacia hidrográfica. Nos rios situados em regiões semiáridos, que apresentam baixas vazões e fluxo sazonal, os processos erosivos são observados com maior magnitude em épocas de chuvas acima da média, o que favorece a ocorrência do nível de margens plenas, contribuindo, para o alargamento do canal. Nos rios situados em regiões de climas mais úmidos, no qual as vazões e precipitações são mais regulares, os processos de alargamento do rio são mais frequentes.

Diante da carência de estudos sobre a perda de margens em rios semiáridos, o presente trabalho procura entender o comportamento da erosão marginal no rio Jaguaribe, situado no Estado do Ceará, no seu baixo curso, em um trecho de aproximadamente 10 km, localizado no município de Quixeré. Este rio é um dos principais mananciais do território cearense, sua bacia hidrográfica ocupa cerca de 50% deste território, o mesmo apresenta suas vazões controladas por reservatórios, a exemplo, o Açude Castanhão.

Para o monitoramento da erosão marginal existem três metodologias relevantes: medições diretas no campo, medições indiretas realizadas através de comparação de mapas antigos e fotografias aéreas; e por última utilização de evidências biológicas e sedimentares (HOOKE, 1980). No presente estudo o processo de erosão das margens do rio Jaguaribe foi avaliado a partir de medidas de campo (método dos pinos de erosão) e utilização de imagens orbitais, tudo isto partindo de uma compreensão sistêmica dos diferentes agentes que atuam dentro e fora do canal fluvial.

O presente trabalho apresenta-se estruturado em cinco momentos de discussões. No primeiro momento são expostos o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa. O segundo momento aborda uma breve discussão teórica sobre temas que

embasam no entendimento dos processos erosivos de margens, sendo estes: a análise sistêmica aplicada aos estudos fluviais; o trabalho dos rios; canais fluviais; processos de erosão e monitoramento de margens; a vegetação ciliar e sua relação com os canais fluviais.

No terceiro momento, apresenta-se a caracterização da área de estudo, assim como os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento dos resultados do trabalho em questão.

Já o quarto momento, abordada os resultados e discussões encontrados durante a pesquisa, como a análise dos dados meteorológicos e hidrológicos da área, o mapeamento do uso e cobertura vegetal; as mudanças morfológicas do canal fluvial do rio Jaguaribe; compreensão dos processos erosivos predominantes para o período avaliado; a análise da magnitude dos processos erosivos; e por último a importância da vegetação ciliar nos processos de erosão de margens.

Por fim, é apresentado as conclusões do entendimento dos processos de erosão de margens no rio Jaguaribe, assim como algumas sugestões de medidas para a contenção do avanço da erosão marginal no rio Jaguaribe.

OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Entender os processos de erosão de margens em regiões semiáridas, de modo específico no rio Jaguaribe no seu baixo curso fluvial.

2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Quantificar o recuo de margens através do método dos pinos de erosão para um período de um ano;
- ✓ Compreender os principais processos erosivos predominantes no trecho em estudo;
- ✓ Analisar a evolução morfológica do canal fluvial na área estudada, através de técnicas de geoprocessamento.
- ✓ Comparar o comportamento da erosão das margens em áreas conservadas, parcialmente conservadas e degradadas;
- ✓ Mostrar as diferentes formas de uso e cobertura vegetal ao longo da área estudada e suas relações com os processos de recuo de margens.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ANÁLISE SISTÊMICA E OS ESTUDOS FLUVIAIS

No século XX, após o aparecimento da mecânica quântica, a ideia da complexidade, interligada à interconectividade unido aos processos sistêmicos, a incerteza advinda das ideias de Heisenberg e o indeterminismo, entre outras formulações, vão gerar novas formas de encarar e interpretar a realidade dos fenômenos, deixando de lado as concepções da ciência clássica, que propunha como método investigativo dos fenômenos naturais a observação a partir do isolamento do seu todo (CAMARGO, 2008).

Neste contexto, muitas teorias vão ser formuladas para análise e compreensão das novas percepções de mundo, dentre estas, destacamos a Teoria Geral dos Sistemas (TGS). Esta teoria segundo Camargo (2008), apresenta-se como um campo metodológico muito importante para suplantar a fragmentação e perceber os fenômenos naturais a partir de sua interconectividade holística.

A Teoria Geral dos Sistemas foi apresentada pelo biólogo Ludwig Von Bertalanffy em 1937, no seminário de filosofia em Chicago, iniciando aí, as várias possibilidades de utilização desta teoria nas diferentes abordagens científicas. Conforme preceitua Bertalanffy (1973),

É necessário estudar não somente partes e processos isoladamente, mas também resolver os decisivos problemas encontrados na organização e na ordem que os unifica, resultante da interação dinâmica das partes, tornando o comportamento das partes diferentes quando estudado isoladamente e quando tratado no todo. (BERTALANFFY, 1973; p. 53).

A Teoria dos Sistemas apresenta como objetivo a formulações de modelos matemáticos de sistemas existentes ou abstratos, partindo do pressuposto de que a superfície geográfica se encontra organizada em sistemas, apesar de que a simples inter-relação de fatores e elementos não chegue, necessariamente, a formar um sistema (CAVALCANTI, 2006).

Segundo Camargo (2008), uma das principais propriedades da TGS é sua busca incessante pelo equilíbrio dinâmico do sistema. Christofolletti (1979, p.57), descreve que “O equilíbrio de um sistema representa o ajustamento completo das suas variáveis internas e às condições externas. [...]”

O sistema conforme Christofolletti (1980), é um conjunto dos elementos e das relações entre si e seus atributos. Para Mattos e Perez Filho (2004), o sistema é definido como um todo organizado composto de elementos que se inter-relacionam. Para estes autores a ideia de sistema só ganha sentido se forem considerados conjuntamente três conceitos, sendo estes: todo, partes e inter-relação. Estes autores descrevem que

A simples interação entre elementos não forma um sistema se não forem capazes de criar algo que funcione como um todo integrado. Por outro lado, não é possível compreender totalmente esse todo se não entendermos quais são suas partes e como elas se inter-relacionam. (MATTOS e PEREZ FILHO, 2004, p.12).

Nos estudos da composição dos sistemas, vários aspectos importantes devem ser considerados, como a matéria, a energia e a estrutura. A matéria corresponde ao material que vai ser transformado no sistema. Já a energia são as forças que condicionam o funcionamento do sistema, gerando a capacidade de realizar trabalho. E a estrutura é constituída pelos elementos e suas relações, expressando-se através do arranjo de seus componentes, sendo considerada a principal unidade básica do sistema (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Os estudos que se dedicam a análise ecológica, a geográfica e a ambiental, englobam estudos considerando a complexidade do sistema e a compreensão dos seus componentes. Diante disto, a abordagem holística sistêmica é essencial para compreender como as entidades ambientais físicas atuam nas suas diferentes organizações e funções (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Perante a importância dos estudos sistêmicos aplicados ao entendimento dos fenômenos da natureza, Christofolletti (1979), preceitua que quando determinamos o sistema a ser estudado, definindo seus componentes e relações, torna-se mais fácil sua delimitação no espaço, e com isto distinguir as suas unidades componentes.

Desta forma, é necessário escolher um recorte espacial para desenvolver os estudos ambientais que se enquadrem na abordagem sistêmica. A bacia hidrográfica ou bacia de drenagem é bom exemplo de unidade espacial a ser compreendida numa perspectiva sistêmica.

A bacia hidrográfica é entendida como uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais para uma saída comum, num determinado ponto do canal fluvial (COELHO NETTO, 2009).

Enquadrando-a como um sistema Zăvoionu (1985), relata que bacia de drenagem, é o resultado de interações entre fluxos de matéria e energia, entrando e movendo-se dentro de seus limites e na resistência de sua superfície topográfica.

Guerra e Mendonça (2007), relatam que as bacias hidrográficas podem ser classificadas como sistemas abertos¹, em termos de entradas (*inputs*) de energia, decorrentes de precipitações, e das saídas (*outputs*) de energia, relacionados à água e sedimentos decorrente dos processos de erosão fluvial e das encostas presentes no âmbito das bacias.

Desta forma Nascimento e Carvalho (2003), afirmam que a bacia hidrográfica deve ser estudada através de uma metodologia sistêmica e holística, baseada na interdisciplinaridade, e que permita a investigação de suas paisagens, identificando os impactos ambientais resultantes das ações sócio-espaciais

Mattos e Perez Filho (2004, p17), compreende que

[...] A bacia hidrográfica não pode ser entendida pelo estudo isolado de cada um de seus componentes: sua estrutura, funcionamento e organização são decorrentes das inter-relações desses elementos, de modo que o todo resultante não é resultado da soma da estrutura, funcionamento e organização de suas partes. Analisar separadamente os processos que ocorrem nas vertentes e aqueles que acontecem nos canais fluviais não permite compreender como o sistema bacia hidrográfica funciona enquanto unidade organizada complexa.

Partindo da ideia que a bacia hidrográfica é um recorte espacial para análise integrada, é fundamental relacionar uma episteme sistêmica que suporte a compressão de uma visão integrada dos diferentes elementos em estudos sobre o ambiente fluvial. Desta forma cabe ao pesquisador analisar os processos, assim como a estrutura do sistema, levando em consideração os elementos externos a rede de drenagem, quanto os elementos presentes na rede de drenagem (SOUZA, 2013).

Charlton (2007), acrescenta que a unidade básica do sistema fluvial é a bacia de drenagem. Os sistemas fluviais são considerados sistemas aberto, o que significa dizer que a energia e os materiais são trocados com o ambiente ao seu redor.

¹ Um sistema aberto é entendido como aquele que realiza diferentes trocas de energia e matéria, tanto ganhando ou perdendo energia. Estes são os mais comuns, podendo ser exemplificados por bacias hidrográficas, vertentes, homem, cidades, entres outros (CHRSTOFOLETTI, 1979).

Conforme preconiza Schumm (2005), o sistema fluvial é condicionado em função do clima, dos eventos geológicos, das características geomorfológicas que ao longo do tempo vão ocorrendo nos diversos pontos da bacia hidrográfica, desde as vertentes nas áreas mais elevadas, até aos fundos dos vales, situadas nas áreas mais rebaixadas.

O sistema fluvial pode ser investigado em diferentes escalas, ou seja, temporal e espacial, mas nenhum componente pode ser totalmente isolado porque há uma interação de hidrologia, hidráulica, geologia, geomorfologia e em todas as escalas. Isso enfatiza que todo o sistema fluvial não pode ser ignorado, mesmo quando apenas uma pequena parte dele está sob investigação. Além disso, é importante perceber que, embora o sistema fluvial constitua um sistema físico, isto segue um desenvolvimento evolutivo, e ele muda ao longo do tempo, apresentando grande variedade ao longo do seu percurso, ou seja, de montante para jusante (SCHUMM, 2005).

No sistema fluvial devido as interações existentes nos seus diferentes componentes, qualquer mudança progressiva em determinada variável pode causar alterações bruscas no seu equilíbrio (SCHUMM, 2005). Desta forma, a bacia hidrográfica atua como unidade fundamental de planejamento para os estudos fluviais, haja vista que as formas de uso e ocupação desenvolvidas dentro e fora do canal fluvial, influenciam inteiramente o equilíbrio fluvial.

Em estudos mais específicos, como análise da erosão de margens, os componentes que formam este sistema devem ser compreendidos de forma integrada, ou seja, relacionar os processos que atuam internamente no canal (tamanho, geometria e a estrutura do barranco; as propriedades mecânicas do material; características hidrodinâmicas do fluxo nas proximidades das margens; entre outros) e os externos (precipitações, vegetação, uso e ocupação do solo) para compreensão da sua dinâmica.

Nesta perspectiva de tentar dar uma resposta aos processos de erosão de margens, Oliveira (2008), apresenta que as questões a responder são: qual o intervalo nas condições do fluxo da corrente que permitem o equilíbrio ao longo da margem, ou seja, que ela se comporte como estável; quais os pontos críticos na margem, para o referido intervalo de condições, pois nesses a margem não será estável, podendo o balanço pender para a erosão ou deposição de sedimentos.

De forma conclusiva os estudos fluviais são importantíssimos para questões de ordem ambiental, social e econômica, a tentativa de compreender tais processos parte de uma compreensão dos diferentes componentes que atuam na bacia hidrográfica e os que atuam mais diretamente no sistema fluvial, mesmo em estudos específicos como os de

erosão de margens, não se pode analisar de forma separada tal fenômeno, partindo assim de uma compressão sistêmica.

3.2 DINÂMICA FLUVIAL

As mais antigas civilizações nasceram e se desenvolveram nas margens dos grandes rios, encontrando no ambiente fluvial os requisitos básicos para sobrevivência, ou seja, solo e água. Além de serem de grande importância para o desenvolvimento das sociedades humanas, os rios são um dos principais agentes geológicos que atuam na modelagem das paisagens.

De acordo com Cunha (2009), os rios podem ser definidos como um amplo corpo de água em movimento, confinado em um canal, sendo o principal tronco do sistema de drenagem. Christofolletti (1980, p.65) afirma que “[...] Geológica e geomorfologicamente, o termo *rio* aplica-se exclusivamente a qualquer fluxo canalizado e, por vezes, é empregado para referir-se a canais destituídos de água. [...]”. O mesmo autor relata que na literatura existem diversas toponímias para definir cursos de água de menor fluxo hídrico, sendo os mais comuns: arroio, ribeira, ribeiro, riacho, ribeirão, entre outros.

Os rios são os principais responsáveis pelo transporte de sedimentos do continente para o litoral, eles atuam como verdadeiros canais de escoamento, sendo elementos integrantes do ciclo hidrológico. Desta forma, o escoamento fluvial compreende a quantidade de água que chega aos cursos de água, incluindo o escoamento pluvial e a infiltração (CHRISTOFOLETTI, 1980).

O escoamento fluvial está sujeito a dois tipos de forças, sendo elas a gravitacional e a de fricção. A força da gravidade conduz a água em direção à jusante, ou seja, as áreas mais baixas da bacia de drenagem, ficando dependente do perfil longitudinal do rio (declividade). Já a fricção atua como obstáculo (resistência) no fluxo fluvial (NOVO, 2008).

O perfil longitudinal de um rio de acordo com Christofolletti (1980, p.96) “[...] mostra a sua declividade, ou gradiente, sendo a representação visual da relação entre a altimetria e o comprimento de determinado curso de água”. Novo (2008), acrescenta que o perfil longitudinal é côncavo, com declividades altas em direção à nascente e baixa em direção a jusante, o que representa o rio em equilíbrio, porém este equilíbrio pode ser modificado com as obras de engenharia, como barragens, canalizações e outras.

O fluxo fluvial conforme Suguio e Bigarella (1990), é caracterizado pela descarga (liquida) de acordo com a expressão abaixo:

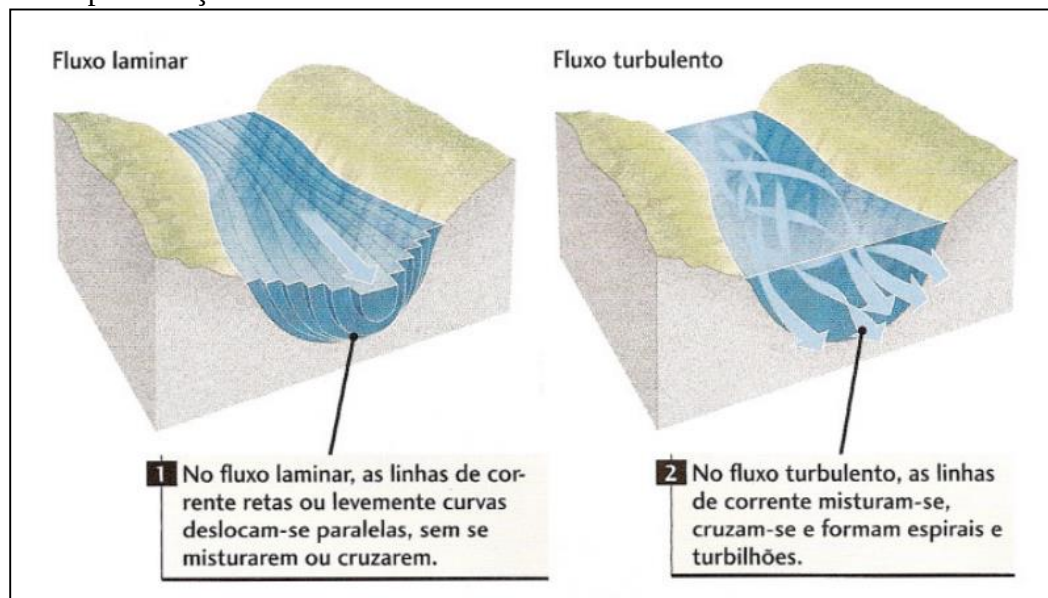
$$Q = A.V \quad (\text{Eq. 1})$$

Esta equação (1), mostra que a vazão (Q) depende da área (A) da secção do canal e da velocidade do fluxo (V).

A relação da secção do canal com a velocidade de fluxo determinará o tamanho máximo de material (de diferentes granulométricas) que pode ser removido pelo rio, caracterizando assim a competência do rio. Já volume de carga transportada como carga de leito, representando a capacidade do rio (Suguio e Bigarella, 1990).

Segundo Christofoletti (1980), o fluxo da água dentro de um canal pode ser laminar ou turbulento. O fluxo laminar é caracterizado pelo escoamento da água ao longo do canal reto, suave, a baixas velocidades, fluindo em camadas paralelas acomodadas umas sobre as outras (não havendo mistura ou cruzamento de camadas). Já o fluxo turbulento é caracterizado por uma variedade de movimentos caóticos, heterogêneos, com muitas correntes secundárias contrárias ao fluxo, principalmente, na direção de jusante do canal (Figura 1).

Figura 1 – Representação do fluxo laminar e fluxo turbulento dentro de um canal fluvial.



Fonte: Press *et al.*, 2008.

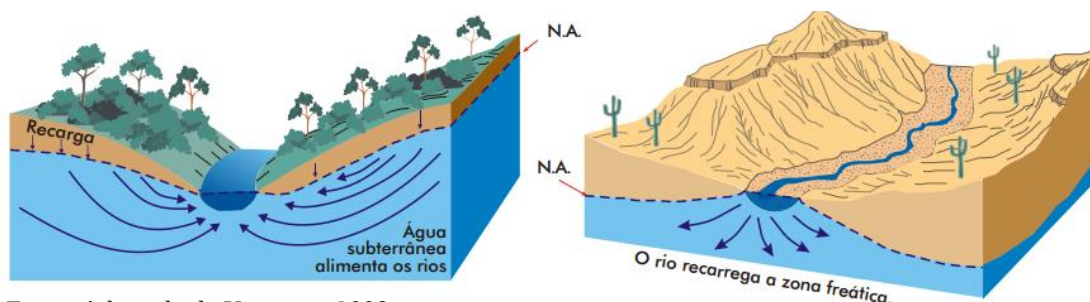
Segundo Suguio e Bigarella (1990), as águas oriundas das chuvas e o fluxo do lençol subterrâneo influenciam sobre as características do deflúvio dos rios. De acordo com o fornecimento de água os rios podem ser efêmeros, intermitentes e perenes.

Os rios que não apresentam fluxos constantes e permanece secos a maior parte do ano são considerados efêmeros, dado que não são alimentados pelo lençol freático e apresentam água somente antes e após as precipitações. Os rios intermitentes são aqueles que em determinados períodos do ano tem seu fluxo interrompido. Já os rios perenes apresentam fluxo estável o ano todo, sendo alimentado pelo lençol freático (SUGUIO e BIGARELLA, 1990).

Além destes, há ainda rios perenizados os quais são rios intermitentes que através de obras de engenharia, como construções de barragens e açudes, apresentam alguns trechos com vazões regularizadas, isto garante o fluxo o ano todo. Um exemplo deste tipo de rio é o rio Jaguaribe, um dos principais do Estado do Ceará, que já foi considerado o maior rio seco do mundo, atualmente apresenta alguns trechos perenizados por açudes, como por exemplo, o Açude Orós e Castanhão, localizados respectivamente, no seu alto e médio curso.

Conforme Christofolletti (1980), o percentual de águas superficiais em relação às águas subterrâneas, que alimentam um curso de água, é bastante variável, sendo condicionado, principalmente, pelo clima, tipo de solo, de rocha, declividade, vegetação predominante, entre outros fatores. Em áreas mais úmidas o lençol freático abastece os rios frequentemente, sendo estes classificados de rios efluentes, já em regiões de clima seco, os rios perdem águas para o subsolo, sendo chamados de rios influentes (Figura 2).

Figura 2 – Comportamento do lençol freático em áreas de climas mais úmida e de climas mais seco.



Fonte: Adaptado de Karmann, 2009.

Nas regiões semiáridas além do fornecimento de água superficial durante uma parte do ano, os rios atuam também como uma reserva de água subterrânea no período de estiagem. O aluvial do rio é perfurado para construção de poços amazonas que garante o abastecimento humano e animal, além de servir para irrigar algumas plantações. Tal prática é muito utilizada na bacia hidrográfica do alto e médio Jaguaribe.

O trabalho desenvolvido pelos rios é entendido pela erosão, transporte e deposição de sedimentos, sendo estes produzidos no continente e transportados até o litoral. De acordo com Huggett (2006), a potência de um rio pode ser definida como sua capacidade de realizar o trabalho do rio, ou seja, de erodir, transportar e depositar sedimentos. Essa potência (*stream power*) pode ser expressa como:

$$\Omega = pgQs \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que

Ω - potência do rio por unidade de comprimento do canal;

p – densidade da água;

Q – descarga;

g – aceleração da gravidade;

s – declividade do canal.

A equação acima, mostra que a potência de um rio aumenta com a vazão (descarga), a declividade do canal e a densidade da água.

Huggett (2006), afirma que a capacidade de um rio erodir e transportar material de montante para jusante, ou seja, ao longo do seu perfil longitudinal, depende da energia cinética da corrente que pode ser expressa pela equação abaixo:

$$E_k = (mCRs)/2 \quad (\text{Eq. 3})$$

Desta forma

E_k = energia cinética;

C – Coeficiente de Chézy, que representa as forças friccionais e gravitacionais;

R – raio hidráulico, que é equivalente à profundidade do canal;

m – massa da água;

s – gradiente da superfície da água.

Desta forma a energia cinética da corrente é diretamente proporcional ao produto do raio hidráulico (R) pelo gradiente da superfície da água, mostrando que, quando mais profundo e mais veloz um rio, maior sua força erosiva.

Segundo Popp (2010), os rios transportam material de três formas, sendo estas por solução, suspensão e arrasto, ou ainda por rolamento e salto. O conjunto (arrasto total)

depende da velocidade e do volume do seu caudal. A maioria dos rios possui três compartimentos e/ou estágios que são direcionados pela inclinação ou declividade do terreno, sendo estes caracterizados de alto curso médio curso e o baixo curso.

A turbulência e a velocidade das águas dentro do canal fluvial estão ligadas diretamente ao trabalho realizado pelos rios, ou seja, erosão, transporte e deposição de sedimentos. Para analisar a importância do trabalho fluvial, deve-se considerar a energia do rio, tanto na sua forma potencial como cinética, desta forma a energia potencial é convertida, pelo fluxo, em energia cinética que, por sua vez, é grandemente dissipada em calor e fricção (CHRISTOFOLETTI, 1981; SUGUIO e BIGARELLA, 1990).

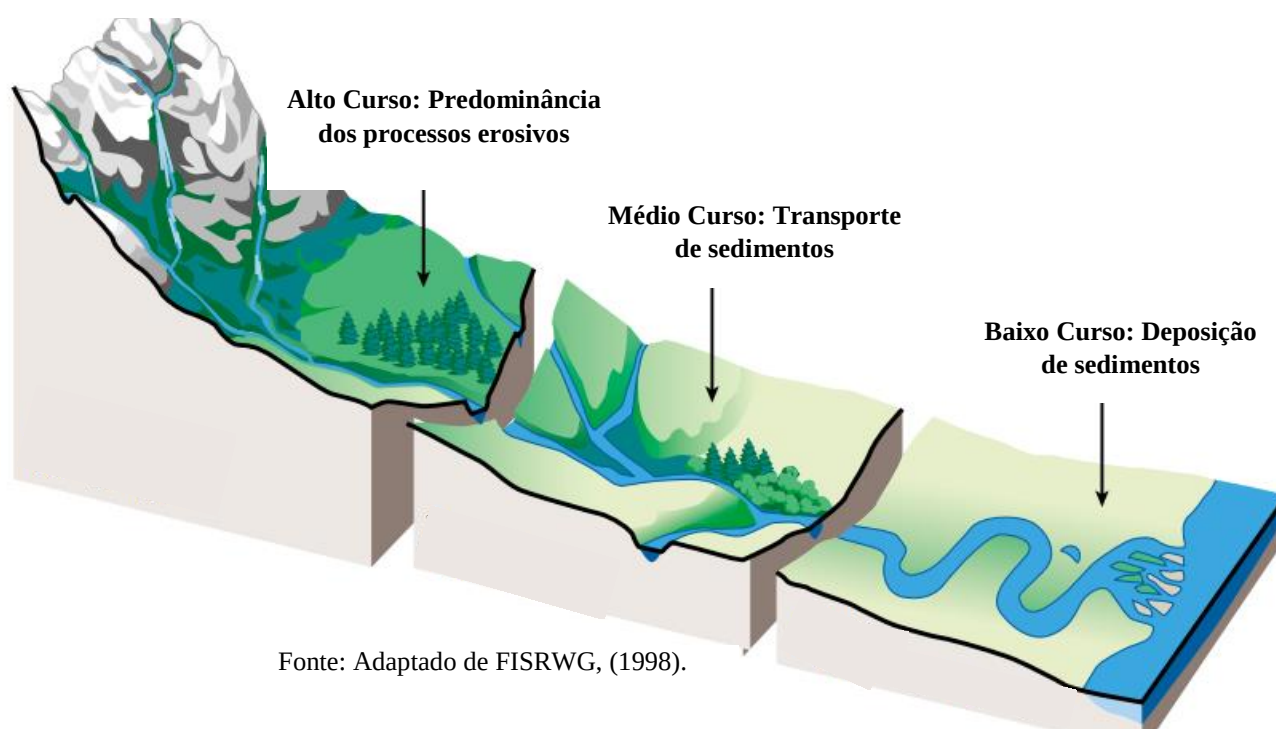
No alto curso fluvial onde são desencadeados os processos erosivos (produção de sedimentos), a energia potencial transforma-se parcialmente em energia cinética que modela o curso e vence a resistência ao movimento. Ao longo do curso a velocidade do fluxo, sofre várias modificações devido ao surgimento de obstáculo que causam maior ou menor resistência ao movimento das águas (fricção). No curso inferior (baixo curso) a energia potencial é utilizada na conservação do movimento, ou seja, ela é quase que completamente consumida para vencer as forças de resistência ao fluxo (CHRISTOFOLETTI, 1981).

De forma resumida, o trabalho executado pelos rios apresentam as seguintes características: no alto curso são desencadeados os processos de produção de sedimentos através da erosão das rochas, no médio curso os sedimentos são transportados e moldados, e no baixo curso predominam os processos de deposição (Figura 3).

Estes processos, na natureza, estão em equilíbrio, ou seja, há um balanço entre a descarga líquida e o transporte de detritos, a erosão e a deposição, de tal modo que a uma proporcionalidade no tamanho da calha do rio, da nascente a sua foz (CUNHA, 2008).

As atividades socioeconômicas não planejadas que ocorrem dentro da bacia hidrográfica influenciam diretamente ou indiretamente na dinâmica dos rios. Entre as principais atividades, destacamos as que ocorrem diretamente dentro do canal fluvial, com as obras de engenharia com o intuito de regularização de vazões, mudanças de canal, assim como remoção de recursos naturais (areias, cascalho), e aquelas que ocorrem fora do canal, estando estas relacionadas ao uso e ocupação do solo na bacia de drenagem, como desmatamento da vegetação ciliar, práticas agropecuárias indevidas, urbanização, entre outras.

Figura 3 - Representação dos compartimentos de um rio, ou seja, alto, médio e baixo curso.



3.3 CANAIS FLUVIAIS

O estudo das características geométricas e de composição dos canais fluviais, consideradas através das relações que se estabelecem no perfil longitudinal dos rios, é denominado de geometria hidráulica (CHRISTOFOLETTI, 1980).

“[...] O conceito de geometria hidráulica foi apresentado por Leopold e Moddock (1953) e, embora não mencionados por tais autores, pode ser considerado como exemplo de sistema morfológico, conforme a tipologia definida por Chorley e Kennedy constituindo, inclusive, exemplos dos mais fáceis para se compreender a aplicação dos conceitos alométricos em geomorfologia” (CHRISTOFOLETTI, 1980, p.69).

À medida que o nível de água no canal fluvial eleva-se, há um aumento da velocidade e consequentemente da força de cisalhamento dentro do canal. Isto ativa as forças erosivas que passam remover o material depositado no leito, promovendo o entalhamento do canal. Contrário à isto, a carga detrítica que passa pela seção transversal é fornecida para área montante, a redução gradativa do fluxo fluvial vai permitindo a deposição da carga sedimentar transportada pelo rio, repercutindo na elevação do nível do leito. Desta forma o entalhamento (fluxo) e a deposição (material sedimentar) são os dois processos responsáveis pela morfologia dos canais fluviais, promovendo ajustes nas

diferentes variáveis da geometria hidráulica, em intervalo de tempo muito curto (CHRISTOFOLETTI, 1981). As variáveis da geometria hidráulica estão detalhadas no quadro 1.

Quadro 1: Variáveis da geometria hidráulica.

VARIÁVEIS PARA O ELEMENTO DE FLUXO	VARIÁVEIS PARA MATERIAL SEDIMENTAR
1. Largura do canal: largura da superfície da camada de água recobrindo o canal; 2. Profundidade: espessura do fluxo medida entre a superfície do leito e a superfície da água; 3. Velocidade do fluxo: comprimento da coluna de água que passa, em determinado perfil, por unidade de tempo; 4. Volume ou débito: quantidade de água escoada, por unidade de tempo; 5. Gradiente de energia: gradiente de inclinação da superfície da água. 6. Relação entre largura e profundidade: resulta da divisão da largura pela profundidade; 7. Área: área ocupada pelo fluxo no perfil transversal do canal, considerando a largura e a profundidade; 8. Perímetro úmido: linha que assinala a extensão da superfície limitante recoberta pelas águas; 9. Raio hidráulico: valor adimensional resultante da relação entre a área e o perímetro úmido ($R = A/P$). Para rios de largura muito grande, o raio hidráulico é aproximadamente ao valor da profundidade média; 10. Concentração de sedimentos: quantidade de material detrítico por unidade de volume, transportado pelo fluxo.	1. Granulometria: as classes de diâmetro do material do leito e das margens, notadamente os diâmetros D_{84}, D_{50} e D_{16}. 2. Rugosidade do leito: representa a variabilidade topográfica verificada na superfície do leito, pela disposição e ajustamento do material detrítico e pelas formas topográficas do leito.

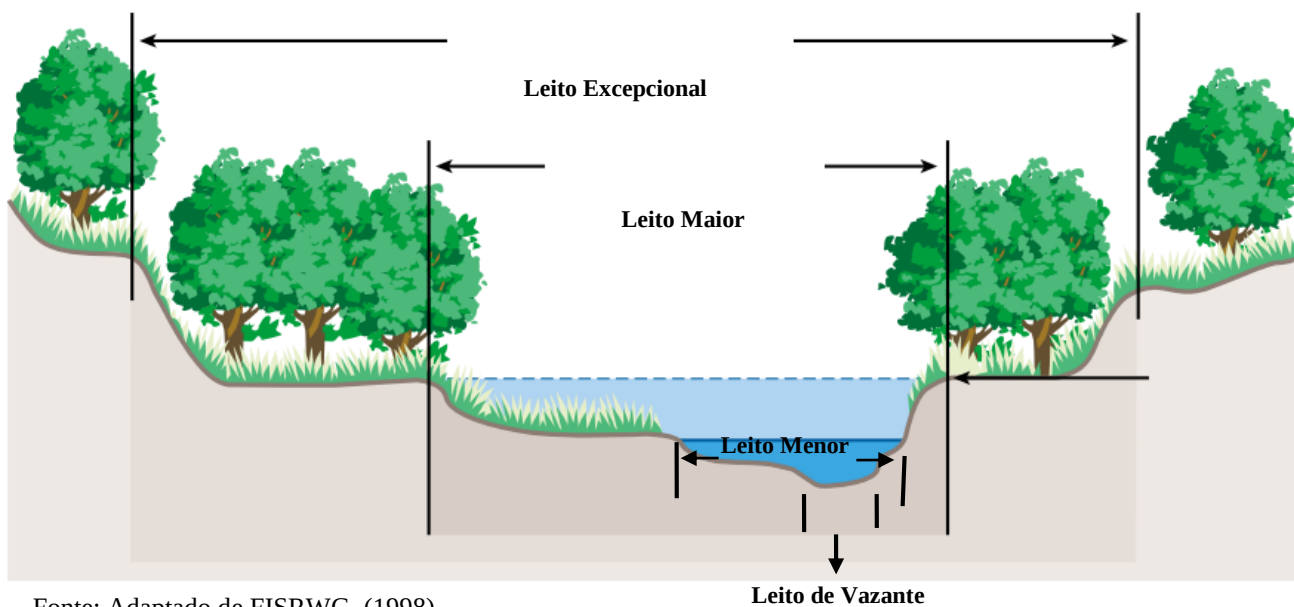
Fonte: Adaptado de Christofolletti, 1981.

O leito fluvial corresponde ao espaço ocupado pelo escoamento das águas. Baseado nas ocorrências das descargas e na topografia dos canais fluviais, o leito fluvial pode ser classificado em leito de vazante (que drena as vazões mais baixas, fazendo parte do leito menor), leito menor (ocupado pelas águas, sendo bem definido), leito maior periódico ou sazonal (é ocupado pelas cheias pelo menos uma vez a cada ano) e o leito maior excepcional (onde ocorrem as cheias maiores, as enchentes) conforme a figura 4.

Em virtude das características do material litológico que compõe o canal, alguns rios sofrem pequenas mudanças durante a cheia, apresentando entalhamento quando se elevam as águas e deposição quando elas se abaixam (CHRISTOFOLETTI, 1981). Porém

esta afirmação não é válida para os rios semiáridos, pois são nas grandes cheias observados as principais mudanças no canal.

Figura 4 - Representação dos tipos de leitos fluviais.



Fonte: Adaptado de FISRWG, (1998).

A análise destas mudanças no canal envolve vários processos, necessitando, portanto, de estudos frequentes para entender as transformações que ocorrem nas várias etapas das cheias dos rios

O nível de descarga de margens plenas (*bankfull discharge*) apresenta grande significado geomorfológico, pois o mesmo proporciona ajuste e mudanças na morfologia dos canais. Conforme Wolman e Leopold (1957), a descarga de margens plenas é definida como a descarga líquida que preenche o canal fluvial, antes do mesmo ser extravasado em direção à planície de inundação².

A topografia do leito em canais aluviais é muito dinâmica, apresentando deslocamentos com as mudanças no fluxo e alterações na forma do canal. Decorrente das diferentes formas do transporte dos sedimentos. Observa-se que o entalhamento em determinada porção do canal é acompanhado pela deposição em outra parte a jusante do canal. No mesmo perfil transversal, algumas partes do canal podem sofrer erosão, enquanto outras ocorrem à deposição (Figura 5). As migrações laterais do canal são ativas

² A planície de inundação é caracterizada como uma superfície plana próxima ao canal fluvial, modelada pela ação erosiva ou deposicional do fluxo das cheias e inundada pelo menos a cada dois anos (FERNANDEZ, 2003).

nas áreas meândricas onde as margens côncavas são solapadas enquanto as convexas recebem deposição de sedimento (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Figura 5 – Processo de erosão e deposição dentro do canal fluvial.



Fonte: Adaptado Google Earth Pro (2014).

As formas que um rio apresenta ao longo do seu perfil longitudinal, é denominada de padrão de canais. Estas formas do sistema fluvial são recorrentes do ajustamento do canal à sua seção transversal e reflete na participação direta das variáveis descarga líquida, carga sedimentar, declive, largura e profundidade do canal, velocidade do fluxo e rugosidade do leito (CUNHA, 2008).

Segundo Riccomini *et al.* (2009), a maioria dos estudos sobre padrões de canais fluviais prega uma classificação fundamentada em quatro padrões básico de canais, designados de retilíneos, meandrante, entrelaçado e anastomosado, ou, respectivamente, de *straight*, *meandering*, *braided*, e *anostomosed* nos trabalhos de língua inglesa.

Dentro de uma bacia hidrográfica podem ocorrer vários padrões de canais, ou seja, em um setor do rio pode ocorrer canais do tipo anastomosado, já em outra parte pode ser caracterizada com padrão meândrico, entrelaçado ou retilíneo, entre outros.

Conforme Cunha (2008), os canais retilíneos são raros na natureza, apresentando-se em limitadas partes de um rio. A condição básica para a existência de um canal reto está relacionada a um leito rochoso homogêneo que oferece igualdade de resistência à atuação das águas. Os canais anastomosados são caracterizados pela concentração excessiva de carga de fundo, que associados com as flutuações das descargas, formam vários canais e ramificações que se dividem e se reencontram, sendo separados por bancos

de areia e ilhas assimétricas. Já os canais meândricos são encontrados com frequências em áreas úmidas, revestidos por vegetação ciliar, apresentam curvas sinuosas harmoniosas e semelhantes entre si, proporcionados pelos processos de erosão e deposição.

Os canais entrelaçados são caracterizados por serem canais largos e rasos com barras intercaladas no meio do canal e baixa resistência à erosão, sendo observados em áreas que apresentam fortes variações de fluxo, como regiões semiáridas (CAVALCANTE, 2012).

Christofolletti (1981) discorre que o conhecimento sobre as características morfológicas e os processos desenvolvidos em cada padrão de canal é de suma importância para planejar as atividades desenvolvidas nas áreas ribeirinhas e do leito do canal, tais como: uso agrícola e urbano; abastecimento de água; projetos de saneamento; entre outras.

3.4 EROSÃO DE MARGENS FLUVIAIS

Segundo Press *et al.* (2006), a erosão é o conjunto de processos que desagregam e transportam o material intemperizado do solo, para depois serem depositados em outras áreas. A erosão pode ser propagada através dos ventos, chuvas (escoamento superficial), pelos rios, entre outros.

Apesar de existir vários processos erosivos na natureza que merecem ser estudados, o presente trabalho, leva a compreensão mais aprofundada dos processos erosivos em margens fluviais.

A erosão das margens de um rio é um fenômeno natural, resultante do processo de adaptação do rio ao vale em que se situa às condições do escoamento. Esta adaptação pode fazer parte do ciclo natural do rio ou pode resultar de ações humanas. Nos dois casos a dinâmica natural do rio é modificada, tendo este a necessidade de encontrar um novo estado de equilíbrio. Durante este processo de ajuste, as margens, devido à função delimitadora do canal que têm, são particularmente afetadas (MAGALHÃES, 2010).

Segundo Fernandez (1990), a erosão das margens de rios, lagos, e reservatórios é um assunto que vem ganhando destaque no cenário científico, isto decorrente dos processos ambientais, sociais e econômicos envolvidos neste fenômeno.

A erosão marginal apresenta grande importância geomorfológica, pois este processo desencadeia diversas mudanças no canal fluvial e atua no desenvolvimento da

planície de inundação. Por se tratar de processos muito dinâmicos, é necessária a compreensão dos mesmos a fim de possibilitar um planejamento adequado quanto ao uso das margens (HOOKE, 1979).

Segundo Souza (2004, p.108), “Erosão fluvial é a erosão causada pelas águas dos rios, principalmente na época de cheias, podendo, em alguns casos, ocasionar a destruição das margens por desmoronamento ou escoamento [...]”. O mesmo autor enfatiza que a erosão fluvial é condicionada por alguns fatores, tais como, a velocidade e turbulência do fluxo, do volume do fluxo e das partículas transportadas nas águas dos rios. Os rios na sua grande maioria têm o aumento do fluxo no sentido de jusante, o que corresponde sua carga, na medida em que este fluxo vai sendo reduzido o material transportado vai sendo depositado.

Conforme o Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico (2011) a erosão de margens é aquela que ocorre nas margens dos rios, intensificando à medida que aumenta a quantidade e a velocidade da água no canal fluvial.

Fernandez (1990, p.2), define a erosão marginal como sendo “[...] o recuo linear das margens, devido à remoção dos materiais do barranco pela ação fluvial (correntes, ondas) ou por forças de origem externa (precipitação)”. Para Novo (2011), a erosão marginal ou erosão lateral, ocorre quando as margens do canal fluvial são removidas, geralmente por solapamento basal e colapso. Neste trabalho iremos adotar o conceito de erosão de margens propostas por Fernandez (1990).

O comportamento da erosão de margens no tempo e no espaço, pode ser relacionado ao tipo climático no qual, está inserida a bacia hidrográfica. Nos rios situados em regiões semiáridos, que apresentam baixas vazões e fluxo sazonal, os processos erosivos são observados com maior magnitude em épocas de chuvas acima da média, o que favorece a ocorrência do nível de margens plenas, contribuindo, para o alargamento do canal. Isto é completamente diferente dos rios localizados em regiões mais úmidas no qual as vazões e precipitações são mais regulares, com isto o alargamento do rio é mais frequente.

Os rios de regiões semiáridas apresentam outra particularidade importante sobre erosão de margens, quando estes apresentam suas vazões controlados por barragens, o processo de erosão de margens pode fugir da lógica natural, ou seja, a erosão pode ser intensificados em qualquer época do ano, mesmo com a ausência de chuvas, tal fato está relacionado com a gestão dos recursos hídricos, pois dependendo da situação que se

encontra os reservatórios, pode ocorrer uma maior liberação de água para rio, e isto pode ocasionar perdas de margens.

A erosão fluvial, ou seja, a erosão dos canais e leitos fluviais ocorre por meio de três processos distintos, sendo estes a corrosão, corrasão (abração) e cavitação. A corrosão está relacionada ao processo químico (intemperismo químico) que realiza com o contato da água com leito e o canal fluvial. A corrasão é o desgaste mecânico, geralmente através das partículas carregadas pelas águas. Já a cavitação ocorre somente sob condições de elevadas velocidades do fluxo (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Em estudos realizados no rio Paraná, Fernandez (1990), identificou mais dois importantes processos erosivos nas margens deste manancial, sendo estes o desmoronamento e o escorregamento rotacional.

O desmoronamento é entendido como a queda livre e rápida de blocos de terra por ações das forças gravitacionais a partir das fases verticais das margens dos rios. O mesmo ocorre por dois tipos, o desmoronamento por cisalhamento e o desmoronamento por basculantes (FERNANDEZ, 1990).

Conforme Fernandez (1990), o desmoronamento por cisalhamento ocorre quando o bloco, devido ao solapamento, desmorona seguindo um plano vertical AB (Figura 6). Já o desmoronamento por basculamento ocorre quando um bloco de terra perde equilíbrio e desmorona sem um prévio solapamento acompanhado pela formação de fendas de tensão na superfície da margem (Figura 7).

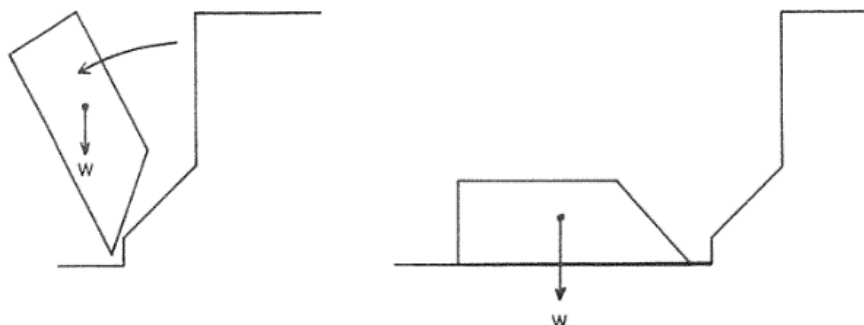
Em relação ao processo erosivo denominado de escorregamento rotacional Fernandez (1990), define como sendo um movimento rápido, de baixa duração, com volume de solo bem definido, cujo o centro de gravidade se desloca para baixo e para fora da margem, ao longo de uma superfície de escorregamento (Figura 8).

Figura 6 – Desmoronamento por cisalhamento.



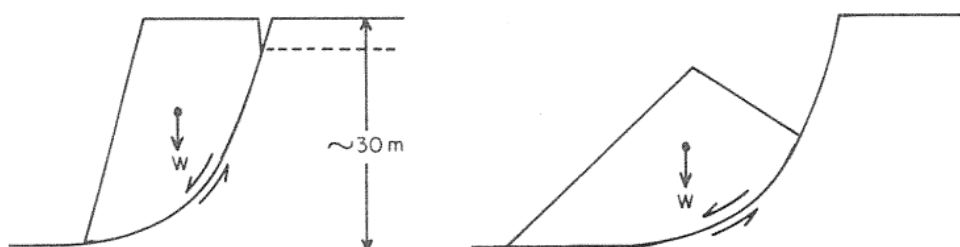
Fonte: Adaptado de Thorne e Tovey (1981).

Figura 7 – Desmoronamento por basculamento.



Fonte: Adaptado de Thorne e Tovey (1981).

Figura 8 – Escorregamento Rotacional.



Fonte: Adaptado de Thorne e Tovey (1981).

A atuação destes processos erosivos ocorre de forma conjunta, contribuindo para alterar as características morfológicas das margens dos rios. Desta forma o entendimento dos processos erosivos atuantes num determinado rio é de suma importância para o combate de perda de margens fluviais.

3.4.1 Estabilidade de margens fluviais

A estabilidade das margens de um rio, corresponde ao equilíbrio entre as forças da gravidade e as forças de resistentes do material que compõe a margem. Este equilíbrio está condicionado ao tamanho e a estrutura das margens, das propriedades físicas do material, do sistema hidráulico de fluxo e das condições climáticas (THORNE e TOVEY, 1981).

O processo de erosão de margens de um rio é analisado baseado em três componentes básicos, sendo estes a estabilidade do material no talude da margem, os

fenômenos responsáveis pela instabilização do material da margem e os mecanismos responsáveis pela rotura (fendas) e consequente queda do material para o canal fluvial (MAGALHÃES, 2010).

Conforme os trabalhos de Thorne e Tovey (1981), Simon *et al.* (1999), Kondolf e Curry (1984, 1986), os fatores que influenciam a estabilidade das margens fluviais são representados pela disposição do material da margem, geometria da margem e o seu revestimento vegetal.

Os materiais que compõem as margens de um rio podem ser compostos por argilas e siltes (material coesivo), de areias, gravilha e seixos de pequenos diâmetros (material granular) e materiais heterogêneos formado pela mistura de diferentes percentagens do material coesivo e granular (THORNE e TOVEY, 1981).

As margens compostas por material coesivo, são mais susceptíveis a erosão, devido apresentarem uma maior resistência às tensões impostas pelo escoamento do canal decorrentes da coesão entre as partículas do material e a existência de poucos vazios. Em margens formadas por material granular, a resistência aos processos erosivos está condicionada ao tamanho das partículas do material e do seu grau de consolidação, ou seja, quanto maior o tamanho das partículas maior o seu peso, consequentemente, a margem fica mais resistente às ações do escoamento. O grau de consolidação do material beneficia a resistência, no sentido em que um solo consolidado tem menos espaços vazios e o imbricamento entre os grãos é maior, dificultando assim sua remoção. Já margens constituídas de materiais compostos, a resistência a erosão dependerá da percentagem presente de argilas e de siltes, do grau de consolidação e do tamanho do material granular (MAGALHÃES, 2010).

A geometria da margem compreende o ângulo e a altura que o talude apresenta. A geometria da margem pode ser alterada por mudanças na hidrologia do rio, ou seja, aumento da altura e do ângulo de inclinação da margem, isto intensifica a ação da força gravitacional, contribuindo para potencializar os processos erosivos (SIMON *et al.*, 1999).

Desta forma margens que apresentam ângulos muito verticais e altura elevada são mais susceptíveis a erodir, comparada as margens com ângulos mais suaves e com baixa altura que são menos propícias a erosão lateral.

A vegetação que recobre a margem é de suma importância para sua estabilidade. Conforme Magalhães (2010), a capacidade da vegetação para aumentar a estabilidade da margem está relacionada com o tipo e vigor da vegetação, densidade e profundidade das

raízes e posição da vegetação na margem, isto interagindo como a composição e deposição do material da margem e sua geometria. Diante da importância da vegetação ciliar, a mesma será discutida em um tópico específico.

3.5 MONITORAMENTO DA EROÇÃO DE MARGENS

Hooke (1979), afirma que os primeiros trabalhos sobre os processos de erosão marginal foram desenvolvidos nos rios da Grã-Bretanha, destacando os trabalhos de Wolman, 1959; Twidale, 1964; Walker e Arnborg, 1966; Lewin, 1972; Hill, 1973; Knighton, 1973; Mosley, 1975.

Segundo Rocha e Souza Filho (2008), a maioria dos estudos relacionados à estabilidade de margens fluviais foi desenvolvida até o momento em regiões de clima temperado e em rios de pequenas bacias de drenagem. Recentemente destacam-se alguns estudos desenvolvidos no Brasil, que avaliam os aspectos da erosão de margens tendo, como exemplo, os realizados no Rio Paraná, desenvolvidos primeiramente por Fernandez (1990), Fernandez & Fúlfaro (1993), Fernandez & Sousa Filho (1995), Rocha & Souza Filho (1998), e Rocha (1999).

Outros trabalhos que merecem ser destacados são os de Rigon (2010), realizados nos córregos mandacaru e da Romeira em Maringá – PR; o trabalho de Rocha (2009) no baixo curso do São Francisco Sergipano; Andrade e Cavalcante (2012) que traz algumas contribuições para o entendimento da erosão de margens em rios semiáridos.

Existem vários métodos para analisar as mudanças nos canais fluviais, assim como a erosão marginal associada. No que se refere ao monitoramento da erosão marginal Hooke (1980), afirma que existem três principais meios de estudar a erosão que são: medições diretas no campo, medições indiretas realizadas através de comparação de mapas antigos e fotografias aéreas; e por última utilização de evidências biológicas e sedimentares.

Nas medições diretas da erosão em campo, existem vários métodos que podem ser utilizados para esta análise, destacando-se: o método dos pinos, o levantamento de perfilagens sucessivas, o método da estaca, o método fotográfico e o método *erosion Box* (FERNANDEZ, 1990). Outro método também utilizado é o BANCS (*Bank Assessment for Non-Point Source Consequences of Sediment*) desenvolvido por Rosgen (2001).

O método dos pinos foi utilizado pela primeira vez por Wolman (1959) e por inúmeros outros pesquisadores. Fernandez (1990), em seus estudos adaptou este método para a realidade dos rios tropicais, pois o mesmo era adotado na sua totalidade nos rios

de regiões temperadas e em rios de pequenas bacias de drenagem. Este método é o mais utilizado na medição da erosão marginal no campo, consiste na introdução de pinos ou pregos na fase das margens, cujo recuo do barranco é medido pelo grau de exposição do pino ou prego (FERNANDEZ, 1990).

O método da estaca, utilizado pela primeira vez por Hughes (1977), e posteriormente por outros pesquisadores, “[...] consiste na instalação de uma série de estacas de madeira na superfície do barranco. A distância entre elas e a margem, é medida com trena. [...]” (FERNANDEZ, p.1990, p.7). Este método é pouco utilizado, pois determina apenas o valor do recuo da borda do barranco, não oferecendo informações sobre os processos de evolução da fase das margens, porém ele é muito útil para áreas onde a margem apresenta uma face vertical e um recuo uniforme.

Já o método das perfilagens, é baseado no levantamento de perfis nas margens estudadas, permitindo observar a evolução progressiva do perfil do barranco, sendo uma maneira gráfica de representar a evolução da fase da margem monitorada ao longo do período de estudo (FERNANDEZ, 1990).

O método fotográfico é desenvolvido através do monitoramento da evolução do recuo das margens, baseado na interpretação de fotografias aéreas da área, na mesma posição e em períodos distintos. Introduzido réguas graduadas verticais e horizontais nas margens, é possível determinar qualitativamente e quantitativamente a erosão marginal através do registro fotográfico (FERNANDEZ, 1990).

O método *erosin box* foi desenvolvido por Smith (1976), este é desenvolvido através da construção de uma caixa de alumínio de 15x15x30 cm (altura, largura, comprimento) com a parte superior descoberta. Dentro deste equipamento é colocada uma amostra indeformada do material proveniente da margem em estudo, onde se determinam o peso e volume desta amostra. A caixa é colocada sobre ação do fluxo, sendo somente retirado após o material apresentar uma remoção de 585 a 1.170 cm³, cujo índice é calculado em Kg/s. O recuo das margens pode ser obtido indiretamente, através da utilização de mapas e fotografias antigas. Este método não apresenta bons resultados em relação à taxa de erosão, decorrentes da precisão dos mapas antigos e das distorções das imagens aéreas (HOOKE, *apud* Fernandez, 1990).

O método BANCS foi desenvolvido por Rosgen (2001), e surgiu do trabalho que este desenvolveu ao longo de vários anos em dois rios independentes, situados em regiões climáticas e geológicas distintas, o rio Lamar no estado do Montana, e o rio Front Range no estado do Colorado, ambos nos Estados Unidos da América. Este método também vem

sendo utilizado em várias regiões climáticas, e sua grande vantagem de utilização são os poucos parâmetros a serem coletados (MAGALHÃES, 2010).

O método BANCS utiliza para a estimativa da taxa de erosão duas componentes de risco, o *Ranking Bank Erosion Hazard Index*, (BEHI) que avalia as características da seção transversal do rio, o revestimento e os tipos de margens, Já o *Near Bank Shear Stress* (NBS), as categorias de risco são avaliada através das determinações das tensões de arrastamento e no gradiente de velocidades na zona próximo as margens (ROSGEN, 2010).

A taxa de erosão é calculada baseado nos resultados das duas categorias de risco, ou seja, BEHI e o NBS, que são cruzadas em um de dois ábacos tipos. A taxa de erosão será determinada através do ábaco que melhor representa às características do rio.

3.6 VEGETAÇÃO CILIAR E SUA RELAÇÃO COM OS CANAIS FLUVIAS

As matas ciliares envolvem todos os tipos de vegetação arbórea vinculada à beira de rios, independentemente de sua área ou região de ocorrência e de sua composição florística (AB'SABER, 2004). Estas formações vegetais recebem diversas nomenclaturas, sendo estas conhecidas como: mata ciliar, floresta ciliar, mata de galeria, floresta ripária, floresta de brejo, entre tantas outras.

Conforme Ab'Saber (2004), a utilização do conceito de florestas ciliares ou matas ciliares é quase total, para o território brasileiro, haja visto que tais formações são visualizadas de uma forma ou de outra em todos os domínios morfoclimáticos e fitogeográficos do país.

Segundo Rodrigues (2004), essas formações florestais ribeirinhas apresentam diferentes tipos vegetacionais, devido ao fato de apresentarem fisionomias distintas, condições ecológicas muito heterogêneas, assim como composições florísticas diferenciadas. Tais formações florestais apresentam em comum apenas sua localização.

As matas ciliares ocupam as áreas mais dinâmica da paisagem, tanto em termos hidrológicos, como ecológicos e geomorfológicos. Diante disto, existem uma forte interação entre os processos geomorfológicos, hidráulicos do canal fluvial, assim como da biótica aquática. Esta interação decorre primeiramente do papel desempenhado pelas raízes da vegetação na estabilização das margens (LIMA e ZAKIA, 2004).

A função das raízes é aumentar a resistência da margem aos processos de cisalhamento. ARAÚJO *et al.* (2008), preconiza que o valor do “[...] sistema radicular

nesse aspecto depende da sua resistência e concentração, características de ramificações e distribuições espacial no solo. A resistência e a arquitetura da raiz, por sua vez, são regularizadas pelo tipo de planta e pelo solo e condições do local[...]

Conforme Simon *et al.* (2004), a mata ciliar exerce fortes controles nos numerosos processos da geomorfologia fluvial e, por sua vez, é dependente de muitos destes processos. Desta forma, a vegetação ciliar pode influenciar diretamente nas taxas de erosão, proporcionando maiores resistências as forças hidráulicas e do cisalhamento. Por esta razão, a vegetação ciliar tornou-se um componente muito importante no controle dos processos erosivos.

O entendimento das interações entre a vegetação ciliar e os processos geomorfológicos é fundamental para a determinação das formas dos canais fluviais e assim, compreender sua dinâmica. Porém, a natureza interdisciplinar desta interação, requer um conhecimento amplo de outras áreas do conhecimento como a hidrologia, hidráulica, transporte de sedimentos, ecologia, botânica, engenharia geotécnicas, entre outros. (SIMON, *et al.*, 2004).

As margens de rios e de reservatórios estão sujeitas à erosão e atrito pelo fluxo hídrico. Desta feita, a vegetação da margem pode contribuir para redução da erosão, conforme as seguintes maneiras: “[...] a parte aérea se inclina e cobre a superfície e/ou reduz a velocidade do fluxo nas adjacências à interfase solo/água, enquanto as raízes abaixo do solo retêm ou mantêm fisicamente as partículas de solo no lugar [...]” (ARAÚJO *et al.*, 2008, p.115). Conforme o mesmo autor, a extensão destas benfeitorias depende da área superficial de vegetação em contato com o fluxo e a flexibilidade dos ramos.

Muitos estudos demonstram a importância da vegetação ciliar nos processos de erosão de margens. Em seus estudos Smith (1976), encontrou que uma margem sedimentar vegetada com um volume de raiz correspondente a 16-18% e com 5 cm de profundidade ofereceu cerca de 20.000 vezes mais proteção a erosão, quando relacionadas a margens com ausência de cobertura vegetal. Já Beeson e Doyle (1995), constataram que margens vegetadas poderiam ser cerca de cinco vezes mais resistentes as não vegetadas, considerando a descarga, declividade, ângulo de curvatura, textura e altura de margens constantes. Tal fato é explicado, pois em margens vegetadas tendem a apresentarem solos com melhor drenagem.

Como discutido a vegetação afeta a estabilidade superficial das margens fluviais, a chuva é um agente erosivo que merece ser analisados nestes processos. O quadro 2, expõe os efeitos positivos da vegetação herbácea e de gramíneas na preservação dos solos

contra a erosão pluvial. Já o quadro 3, representa os efeitos favoráveis da vegetação na estabilidade das encostas.

Quadro 2: Efeitos benéficos da vegetação herbácea e de gramíneas na preservação da erosão pluvial.

EFEITO	CARACTERÍSTICA
Interceptação	As folhagens e os resíduos de plantas absorvem a energia da chuva e impedem o destacamento do solo pelo impacto da chuva.
Contenção	O sistema radicular ata ou contém fisicamente as partículas do solo, enquanto as partes acima da superfície filtram os sedimentos do escoamento superficial.
Retardamento	Os caules e as folhagens aumentam a rugosidade da superfície e diminuem a velocidade do escoamento superficial.
Infiltração	As plantas e seus resíduos ajudam a manter a porosidade e a permeabilidade do solo, consequentemente atrasando ou mesmo impedindo o início do escoamento superficial.
Infiltração	As plantas e seus resíduos ajudam a manter a porosidade e a permeabilidade do solo, consequentemente atrasando ou mesmo impedido o início do escoamento superficial.

Fonte: Adaptado de Araújo *et al.* (2008).

Quadro 3: Efeitos positivos da vegetação na estabilidade de massa de encostas.

EFEITO	CARACTERÍSTICA
Reforço do sistema radicular	As raízes reforçam o solo mecanicamente pela transferência da força de cisalhamento no solo para resistência às tensões nas raízes.
Redução da umidade do solo	A evapotranspiração e a interceptação na folhagem podem limitar o desenvolvimento de uma poropressão positiva.
Suporte e arqueamento	Os caules ancorados e incrustados podem agir como suporte ou pilhars, cancelando as forças de cisalhamento para baixo da encosta.
Sobrecarga	O peso da vegetação pode, em certos casos, aumentar a estabilidade, confinando a tensão (normal) na superfície de cisalhamento.

Fonte: Adaptado de Araújo *et al.* (2008).

Conforme apresentado, a vegetação em especial arbórea, apresenta um efeito positivo na estabilidade de margens, porém, conforme Araújo *et al.* (2008), a vegetação

arbórea pode trazer alguns efeitos negativos sob certas condições como, por exemplo, a sobrecarga, o tombamento pelo vento e o atrito de caules grandes e rígidos que se desenvolvem nas margens dos rios. Vale ressaltar que os efeitos positivos da vegetação na estabilidade superam seus efeitos negativos.

Apesar da importância da vegetação ciliar para sistema fluvial e suas diversas interações, está vem sendo impactada indiscriminadamente. A degradação das matas ciliares está ligada diretamente ao uso e ocupação do solo. Segundo Rodrigues e Gandolfi (2004), no Brasil, assim como na maioria dos países, a degradação das matas ciliares sempre foi e continua sendo fruto da expansão desordenada das fronteiras agrícolas.

Conforme Rodrigues e Gandolfi (2004),

Esta expansão da fronteira agrícola brasileira tem se caracterizado pela inexistência (ou ineficiência) do planejamento ambiental prévio, que possibilitasse delimitar as áreas que deveriam ser efetivamente ocupadas pela atividade agrícola e as áreas que deveriam ser preservadas em função de suas características ambientais ou mesmo legais. Esse planejamento, quando existente e de qualidade considerou apenas uma propriedade rural, independente das características e do planejamento das propriedades do entorno, condicionando assim o seu insucesso na preservação ambiental. (RODRIGUES e GANDOLFI, 2004, p.235).

Além da expansão agrícola outras atividades contribuem para a remoção da vegetação ciliar como, por exemplo, a carcinicultura (criação de camarão em cativeiro) que vem ganhando espaço principalmente com os investimentos do Ministério da Pesca e Aquicultura. No baixo curso do rio Jaguaribe, precisamente, nos municípios de Jaguaruana, Itaiçaba e Aracati, existem várias fazendas de camarão que estão ocupando as áreas de vegetação ciliar.

Os principais problemas ocasionados pela remoção da mata ciliar são: o fim dos corredores ecológicos que possibilitam o fluxo de animais e propágulos (pólen e sementes); aumento do processo de assoreamento, contaminação por lixiviação ou escoamento superficial de defensivos agrícolas (agrotóxicos) e fertilizantes; instabilidade dos solos marginais intensificando os processos erosivos e o solapamento das margens; e o aumento da entrada de radiação solar nos mananciais aumentando sua temperatura (KAGEYAMA et al, 2001).

3.6.1 Área de Proteção Permanente (APP)

Numa forma de minimizar a degradação das formações vegetais no território brasileiro, no ano de 1934 foi criado o Código Florestal, representado pelo Decreto N° 23.793, de 23 de janeiro de 1934. Esta tentativa de preservar as florestas pelo Estado brasileiro (regime intervencionista) não surtiu efeito, e a degradação continuou crescendo descontroladamente. No ano de 1965, uma nova tentativa de diminuir os impactos nas florestas nacionais é realizada, a Lei N° 4.771 de 15 de setembro de 1965 denominada de novo Código Florestal é sancionada, a mesma traz como novidades a criação da Reserva Legal (RL) e a Área de Proteção Permanente (APP).

A Área de Preservação Permanente (APP) é definida como uma área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (BRASIL, 2012).

São consideradas APP's, as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular; as áreas no entorno das nascentes e dos olhos d'água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica; as encostas ou partes destas com declividade superior a 45°; as restingas, como fixadoras de dunas ou estabilizadoras de mangues; os manguezais, em toda a sua extensão; as bordas dos tabuleiros ou chapadas; no topo de morros, montes, montanhas e serras; as áreas em altitude superior a 1.800 (mil e oitocentos) metros. (BRASIL, 2012).

Cada Área de Proteção Permanente, apresenta uma forma específica de delimitação, no caso das faixas marginais, estas são demarcadas baseadas na largura do canal fluvial, tendo como referência seu leito regular, ou seja, a calha por onde correm regularmente as águas do curso d'água durante o ano, isto conforme a Lei N° 12.651 de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), sendo o valor mínimo de proteção 30 (trinta) metros e o máximo de 500 (quinhentos) metros para cada margem. A tabela 1 detalha as faixas destinadas à proteção ambiental nos rios.

Conforme Andrade et al (2014), as alterações propostas pelo novo texto do Código Florestal de 2012 foram várias. Uma destas foi a forma de delimitar a Área de Proteção Permanente das faixas marginais dos rios, que a priori eram baseadas na largura do leito maior do rio (Lei 4.771/65), ou seja, aquele que regularmente é ocupado pelas cheias, pelo menos uma vez cada ano, passando agora a ser baseada na largura do leito regular. Tal mudança para os rios semiáridos trouxe reduções significativamente nas APPs, pois

o leito regular apresenta um tamanho consideravelmente menor em relação ao leito maior, além do que em alguns casos a APP do rio poderá estar dentro do canal maior, que não contribuem para preservação e conservação do rio.

Tabela 1 - Áreas de Proteção Permanente de acordo com a largura do rio.

Largura do Rio (m)	Área destinada a Proteção Permanente (m)
10	30
10 a 50	50
50 a 200	100
200 a 600	200
Acima de 600	500

Fonte: Adaptado Brasil, 2012.

Tal fato é explicado devido a dinâmica dos rios semiáridos do Nordeste brasileiro, que são muito diferentes dos rios dos outros domínios morfoclimáticos do país. Desta forma, Andrade et al. (2014), mostram que a reformulação do Código Florestal (Lei 12.651 de 2012) deveria ter considerado as diversas particularidades dos domínios morfoclimáticos presentes no território brasileiro, não estabelecendo uma redação de aplicação única para todas as regiões do país, pois cada domínio apresenta características próprias que devem ser respeitadas, a exemplo dos rios semiáridos nordestinos.

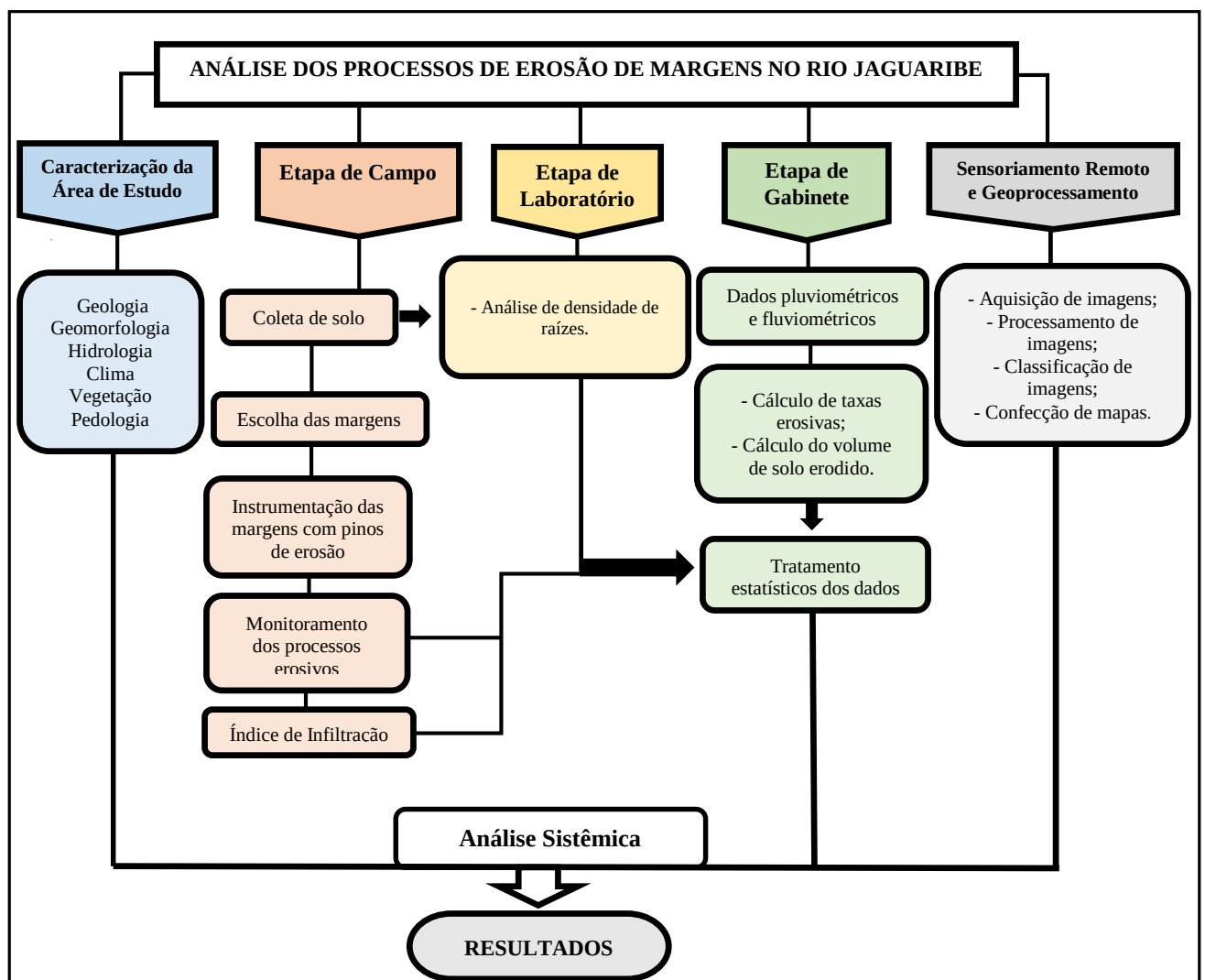
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente estudo apresenta como recorte de análise um trecho do rio Jaguaribe, situado na Sub-bacia do Baixo Jaguaribe, precisamente, no município de Quixeré. Na busca de entender os processos de erosão de margens na área em estudo, a pesquisa apoia-se na análise sistêmica, para assim, compreender os diferentes condicionantes que atuam de forma direta ou indiretamente nos processos de erosão de margens no rio Jaguaribe.

Para alcançar seus objetivos, o trabalho estruturou-se das seguintes etapas: caracterização da área de estudo; etapa de campo, etapa de gabinete, etapa de laboratório, e Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (Figura 9). Para uma compreensão das etapas propostas, as mesmas serão apresentadas detalhadamente a seguir.

Figura 9- Fluxograma metodológico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As regiões semiáridas se caracterizam por seu balanço hídrico deficitário particularmente no que se refere às trocas com a atmosfera, apresentando contínua interrupção na disponibilidade de água (ARAÚJO, 2012). O semiárido brasileiro envolve uma área de 969.589,4 km², cerca de 60% do Nordeste e 11,34% do território nacional. Segundo Ab'Saber (2003), a hidrologia regional do Nordeste seco é particular e influenciada totalmente pelo ritmo climático sazonal, que predomina no espaço fisiográficos dos sertões.

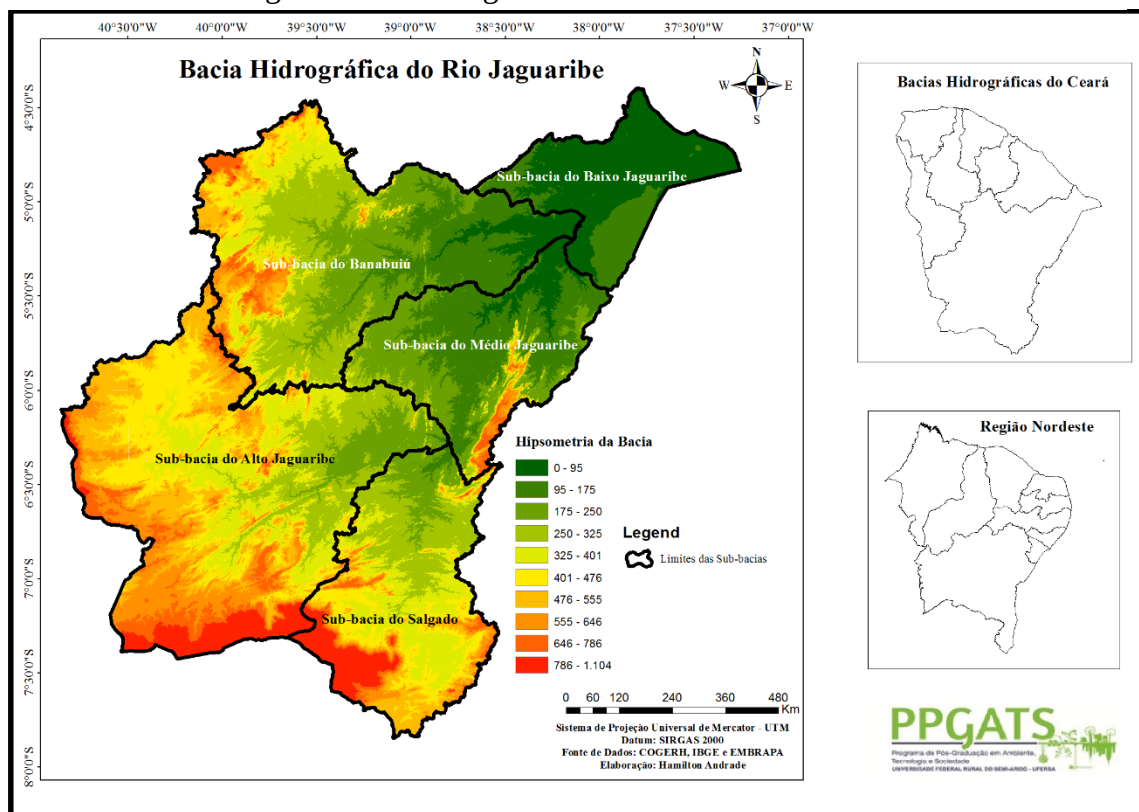
Os rios semiáridos do Nordeste diferentemente dos rios das áreas mais úmidas do território brasileiro, no período de estiagem secam desde suas cabeceiras até próximo à costa. Outra característica destes rios está em sua alta variabilidade de descarga influenciada pela dinâmica das chuvas, em geral concentradas e mal distribuídas.

Neste contexto, destacamos o rio Jaguaribe, um dos mais importantes do Estado do Ceará, com extensão de aproximadamente 610 km desde sua nascente na Serra da Joanhina (município de Tauá), até sua desembocadura no Oceano Atlântico no município de Fortim. A bacia hidrográfica em questão, ocupa quase 50% do território cearense, sendo dividido em cinco Sub-bacias: Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Bacia do Banabuiú e Bacia do Salgado (Figura 10).

Conforme Cavalcante e Cunha (2012), o rio Jaguaribe no seu alto curso apresenta baixa sinuosidade (1,2), com larguras de margens plenas que pode variar de 60-180m e profundidade que pode alcançar 3 metros. No seu médio e baixo curso, sua sinuosidade varia de 1,2 para montante a 1,5 nas intermediações da sua foz, já a largura das margens plenas do canal varia entre 150-400 metros. O rio apresenta diferentes padrões de canais em sua transição do médio ao baixo curso do rio. No alto curso é difícil definir seu padrão de canal, haja vista, a predominância dos processos erosivos em detrimento aos deposicionais.

Não fugindo da realidade da grande maioria dos rios do Nordeste, o rio Jaguaribe apresente trechos controlados por reservatórios artificiais de pequeno, médio e grande porte (CAVALCANTE e CUNHA, 2012). A exemplo disto, destacamos o Açude Orós (2 bilhões de m³) situado no seu alto curso e o Açude Castanhão (6,7 bilhões de m³) que fica situado no seu médio curso.

Figura 10 - Bacia Hidrográfica do Rio Jaguaribe



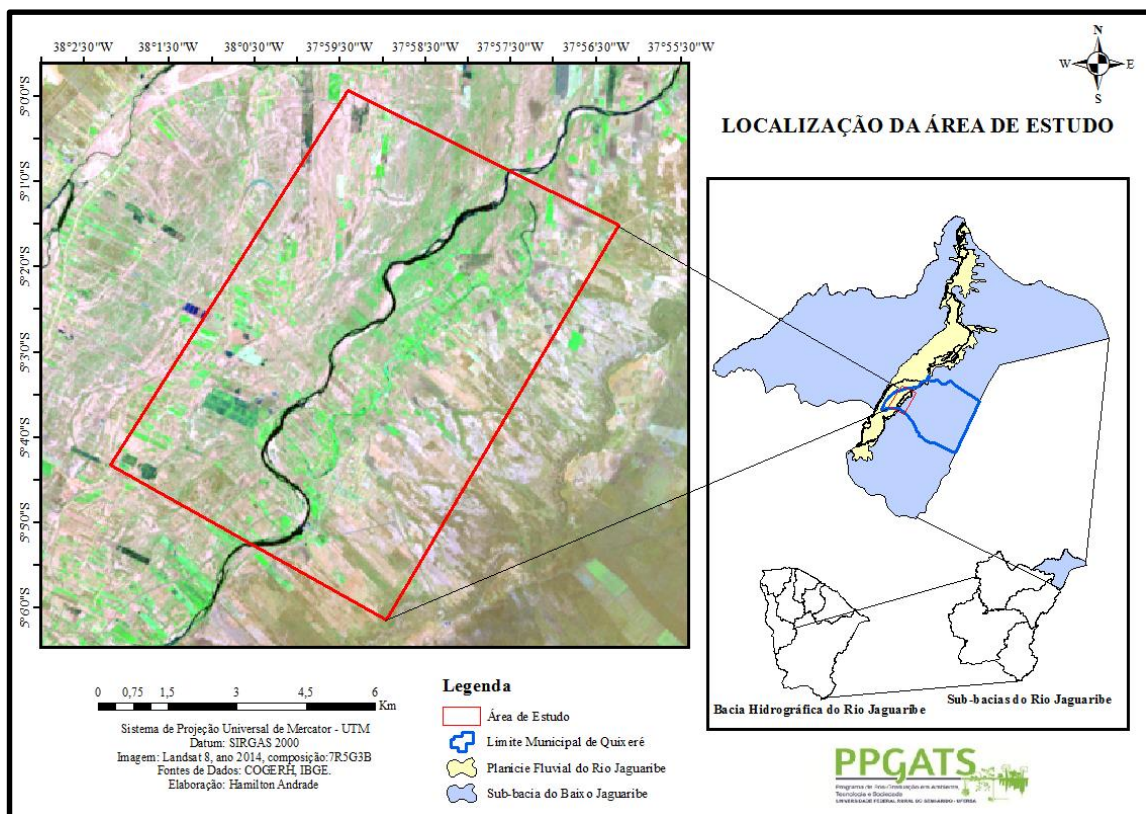
Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

O presente trabalho foi realizado na Sub-bacia do baixo Jaguaribe, precisamente no município de Quixeré. O trecho em estudo apresenta uma extensão de 10 km, contando a partir da passagem molhada³ do Quixeré (localizada na zona urbana do município de Quixeré) até a passagem molhada de Sucurujuba, na sua zona rural do município em questão (Figura 11).

A Sub-bacia do Baixo Jaguaribe apresenta a menor área de drenagem (7.021 km²) quando comparada as cinco Sub-bacias que compõe a Bacia Hidrográfica do rio Jaguaribe, representando apenas 4% do território cearense. Tal unidade apresenta terrenos com altimetria inferior a 200 metros, com predominância de relevo plano a moderadamente dissecado em interflúvios tabulares intercalados com setores de planícies fluviais. Nesta área predominam amplas extensões de sedimentos holocênicos que proporcionam grandes áreas aluvionares com potencialidade de água subterrânea. Os canais próximos à foz têm caráter anastomótico e meândrico que reflete uma intensa dinâmica na área (CEARÁ, 2009).

³ Passagens molhadas são estruturas que possibilitam a ligação entre um município e suas comunidades rurais, entre dois municípios, e em sua maior parte, entre comunidades (BEZERRA, 2010).

Figura 11 - Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

O clima predominante nesta Sub-bacia é o clima Semiárido Quente e Subúmido que propicia temperaturas anuais médias em torno dos 26°C a 28°C, apresentando uma média pluviométrica anual de 838,0 mm. A mesma apresenta sedimentos Cenozóicos do período Quaternário nos aluviões do rio Jaguaribe, onde predominam os solos Neossolos Flúvicos, e na Planície Litorânea, que corresponde as Dunas e Paleodunas, compostas por solos do tipo Neossolos Quartzarênicos da Formação Barreiras (CEARÁ, 2009).

De acordo com Ceará (2009), a vegetação predominante nesta área são o Complexo Vegetacional da Zona Litorânea, ao norte, e a Caatinga Arbustiva Densa, a oeste, além da Mata Ciliar margeando o leito do rio Jaguaribe.

No trecho em estudo a vegetação ciliar é composta pela Floresta Mista Dicótilo-Palmacea, apresentando como espécie dominante a carnaúba (*Copernícia prunifera*), e outras espécies como a oiticica (*Licania rígida*), mulungu (*Erithrina velutina*), juazeiro (*Zyziphus joazeiro*) e outras com menores representações (ANDRADE e ALMEIDA, 2013).

A Sub-bacia do Baixo Jaguaribe é considerada uma das regiões cearense de grande destaque, devido seu crescimento econômico nas últimas décadas, decorrente

principalmente, da atividade agropecuária. Este crescimento tem um lado negativo, pois os sistemas ambientais, como exemplo, a planície fluvial, vem sofrendo com as modificações humanas, que muitas vezes não respeitam a ecodinâmica do ambiente, comprometendo seu equilíbrio natural. A introdução da agricultura irrigada nas margens do rio Jaguaribe, tem dizimado a vegetação ciliar, isto pode acelerar os processos de erosão de margens no rio.

4.3 ETAPA DE CAMPO

Os trabalhos de campo são de fundamental importância, para pesquisas que buscam entender a dinâmica dos fenômenos da natureza. Tratando-se do objeto de estudo deste trabalho, ou seja, os processos de erosão de margens que são muito dinâmicos, a etapa de campo é indispensável para o seu monitoramento e entendimento.

Desta forma, foram realizadas visitas técnicas para reconhecimento da área de estudo, assim como a escolha dos melhores pontos para monitoração e análise da erosão marginal, sendo está dividida em cinco momentos: A escolha das margens; instrumentalização das margens; observação dos processos erosivos das margens; coleta de solo; e aplicação do Índice de Infiltração proposto por Maia (2014); além da coleta de outros dados relevantes como ângulo e altura das margens, profundidade das raízes, entre outros.

4.3.1 Escolha das Margens

A escolha das margens para monitoramento se deu a partir do grau de conservação da vegetação ciliar e os usos sobre elas. Para isto foram escolhidas nove seções para análise que foram agrupadas em três tipos de áreas, sendo estas: Área Conservada (AC), Área Parcialmente Conservada (APC) e Área Degradada (DC) (Quadro 4).

Foi considerado Área Conservada, as margens que mantinham suas características naturais, sem alterações significativas na sua vegetação natural e com ausência de usos sobre elas (Figura 12). A Área Parcialmente Conservada foi definida como sendo aquela em que a vegetação ciliar sofreu alterações, mas ainda predominam algumas espécies e não dispõem de atividades permanentes sobre a mesma (Figura 13). Já a Área Degradada, foi denominada como sendo as de margens onde a vegetação foi significativamente alterada e com atividades permanentes sobre elas (Figura 14).

Quadro 4 - Áreas monitoradas no baixo curso do rio Jaguaribe.

Nome da Seção	Tipo de Área
Água Fria	Área Conservada (AC)
Rio Cruzes	
Sucurujuba II	
Canelas II	Área Parcialmente Conservada (APC)
Sinhã	
Sucurujuba I	
João de Izídio	Área Degradada (AD)
Rio Eduardo	
Canelas I	

Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Figura 12 - Área considerada conservada.



Fonte: Dados da pesquisa, 2014.

Neste trabalho, foram definidas atividades não permanentes aquelas que não são observadas com frequências sobre a margem, a exemplo, das atividades recreativas, e atividades ligadas a pesca. Já as atividades permanentes são aquelas que são fixas sobre a margem, como a agricultura irrigada, pecuária, viveiros de peixes e camarão, assim como construções civis.

Outro fator relevante para a escolha das margens foi a facilidade de acesso, isto facilitou os trabalhos de monitoramento

Figura 13 - Área considerada parcialmente conservada.



Fonte: Dados da pesquisa, 2014.

Figura 14 - Área considera degradada.



Fonte: Dados da pesquisa, 2014.

4.3.2 Instrumentação das Margens

Após a escolha das margens, as mesmas foram instrumentalizadas para a compreensão dos processos erosivos. Neste sentido foi utilizado o método de medição direta da erosão de margens, conhecido como método dos pinos, que consiste na introdução de pinos na face das margens. A medida que a margem vai recuando, é medida a exposição do pino (Figura 15). Este método é bastante utilizado e de fácil compreensão, o que facilita seu uso. As primeiras utilizações deste método no Brasil foram realizadas por Fernandez (1990).

Figura 15 – Instalação dos pinos nas margens.



Fonte: Dados da pesquisa, 2014.

Em cada seção de monitoramento foi instalado uma quantidade específica de pinos, baseado nas características da margem como altura e ângulo (Quadro 5). Os pinos foram colocados a uma distância horizontal de 2 m de separação. Os pinos utilizados são construídos de ferro, tendo 1 m de comprimento, com 5,16 mm de diâmetro. Estes introduzidos nas margens ficaram com 10 cm de exposição e foram pintados de cor branca para facilitar a sua localização conforme a figura 16.

Quadro 5 – Quantidade de pinos em cada seção monitorada e altura das margens.

Seções	Quantidade de Pinos	Altura da Margem (m)
1. Izídio	6,0	5,0
2. Rio Eduardo	9,0	4,0
3. Canela I	6,0	3,0
4. Canela II	6,0	3,1
5. Água-Fria	6,0	4,0
6. Sinhã	6,0	3,0
7. Rio Cruzes	9,0	3,4
8. Sucurujuba I	9,0	2,5
9. Sucurujuba II	6,0	3,5

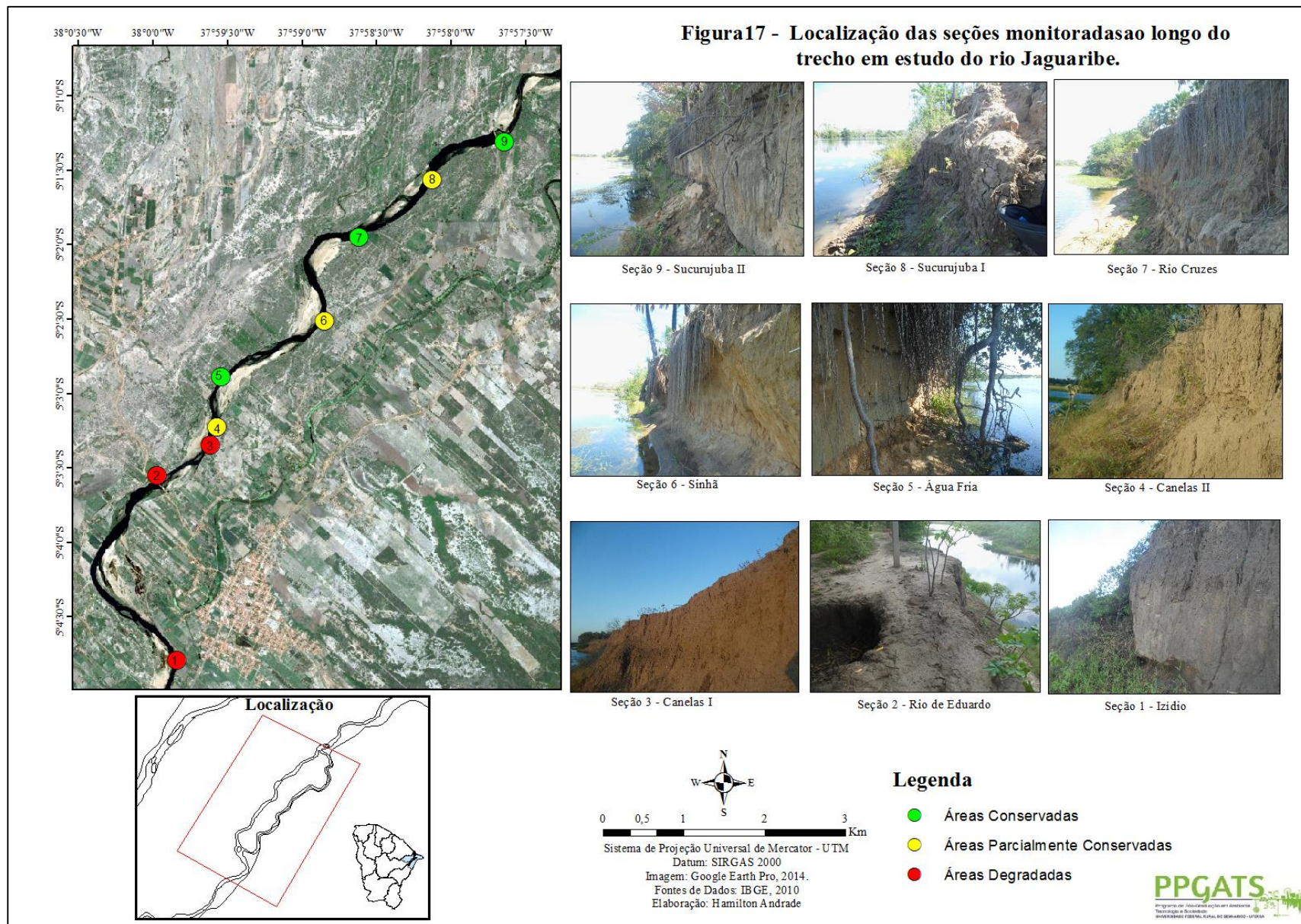
Fonte: Dados da pesquisa, 2014.

Figura 16 – Pino introduzido na margem e com exposição padrão de 10 cm.



Fonte: Dados da pesquisa, 2014.

As seções monitoradas foram referenciados com auxílio de GPS (Sistema de Posicionamento Global) do tipo *garmim etrex*, e registrados através de máquina fotográfica, também foram escolhidos pontos de referência em cima das margens, como cercas e árvores, para amarrações caso o recuo das margens fossem sejam superiores ao tamanho dos pinos. As seções foram instaladas ao longo do trecho em estudo conforme a figura 17.



4.2.3 Monitoramento dos Processos Erosivos

Após a instrumentalização das margens, as mesmas passaram a ser monitorados mensalmente ou após grandes chuvas na área, sendo isto acompanhado pelos dados de variação do nível do rio (Figura 18). O período de monitoramento da erosão marginal nas margens instrumentadas foi de junho de 2014 a maio de 2015, totalizando 12 meses de análise. Tal intervalo de observação abrangeu um período seco (junho – janeiro) e um período de precipitações (fevereiro – maio), porém com chuvas abaixo da média histórica.

Figura 18 – Monitoramento do recuo dos pinos.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

4.3.4 Coleta de Solo

Nesta etapa foram coletadas amostras de solo das margens, com o seguinte propósito, determinar o volume de raízes, ou seja, a densidade de raízes nas margens monitoradas. Para isto foi recolhido de forma aleatória para cada margem 20 amostras de solo. Nesta coleta foi utilizado Trado Umland (Figura 19). Após serem coletadas as amostras foram colocadas em sacos plásticos e levadas ao Laboratório de Biotecnologia da UFERSA/Mossoró para a realização das análises de densidade de raízes.

Figura 19 - Coleta de solo utilizando o Trado Urland.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

4.3.5 Índice de Infiltração

Nesta etapa foi aplicado um teste de Infiltração baseado em Maia (2014), para isto foi utilizado cinco garrafas *pets* de 2 litros. As tampas das garrafas foram perfuradas com auxílio de um estilete, no intuito de propor uma abertura que possibilite uma vazão de aproximadamente 2 L/h. Para obter este resultado foi utilizado uma proveta de 50 ml, que serviu para calcular a vazão liberada pelas tampas. Também foi confeccionado um suporte de ferro para dispor as garrafas conforme a figura 20.

Figura 20 - Suporte utilizado na aplicação do teste de infiltração proposto por Maia (2014).



Fonte: Dados da pesquisa, 2015

Sobre as margens e de forma aleatória foram instalados os cinco suportes com suas receptivas garrafas. Em cada reservatório foi aplicado 1,0 litro de água (Figura 21), que ficou gotejando o solo. Após o volume das garrafas esvaziar completamente, foram abertas trincheiras sobre a área molhada para determinar a profundidade máxima de infiltração (Z_{max}). Para isto foram utilizados uma espátula de aço 100 mm e uma régua para medir a profundidade que a água infiltrou no solo.

Figura 21 - Disposição das garrafas sobre a margem.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

4.4 ETAPA DE LABORATÓRIO

As amostras colhidas em campo foram levadas ao Laboratório de Biotecnologia da UFERSA/Mossoró, sendo estas submetidas aos procedimentos convencionais para determinação da densidade de raízes presentes nas margens.

Para determinar o teor de raízes presentes em cada margem, as amostras foram peneiradas em peneira de malha de 5 mm. O objetivo desta etapa foi separar as raízes do solo. Com ajuda de uma pince foram retirados, cuidadosamente, as raízes contidas na amostra. Em seguida as mesmas foram colocadas em sacos de papel e foram levadas a estufa a 70° C por 24 horas para remoção da umidade. Depois de retiradas da estufa as raízes foram pesadas em balança de precisão (Figura 22). O peso de cada amostra foi anotado para posteriormente ser determinada a densidade de raízes nas margens analisadas.

4.5 ETAPA DE GABINETE

Nesta etapa foram realizadas análises dos dados oriundos dos trabalhos de campo que foram utilizados para determinar a taxa de erosão e o volume erodido das margens. A densidade de raízes e aplicação do teste de Infiltração proposto por Maia (2014), assim como os dados de laboratório, serviram para determinar a densidade de raízes das margens. Também foram utilizados dados de precipitações e vazões do rio. Estas informações estão disponíveis em algumas instituições públicas (ANA, FUNCEME).

Figura 22 - Raízes contidas no solo.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

4.5.1 Determinação da taxa de erosão e o volume erodido

Com o monitoramento do recuo dos pinos durante os 12 meses de estudos, foi determinado a taxa de erosão (cm/mês) e o volume erodido (m³/ano) para cada margem. A magnitude da erosão após cada medição foi calculada mediante a seguinte fórmula, utilizada por Fernandez (1990):

$$Em = (L1 - L0)/t \quad (Eq.4)$$

Em que “Em” é a magnitude da erosão (cm mês⁻¹), “L1” é o comprimento do pino exposto pela erosão (cm), “L0” é o comprimento do pino deixado exposto após cada levantamento (cm) e, “t” é o tempo transcorrido em meses entre cada campanha de campo.

Segundo Fernandez (1990), a erosão média para uma seção monitorada, após cada campanha de medição é o somatório dos recuos registrados divididos pelo número de pinos dispostos na margem.

Já a erosão média anual foi obtida pela média aritméticas das erosões médias adquiridas ao longo de um ano de observações conforme equação (5) utilizada por Fernandez (1990):

$$Me = H \cdot Er \cdot Em \quad (Eq.5)$$

Em que “Me” é o volume de material erodido (m³/ano), “H” é a altura da margem (m), “Er” é a erosão média anual (m/ano), “Em” é a extensão lateral da margem instrumentada (m).

4.5.2 Densidade de raízes e teste de infiltração

As amostras das raízes foram realizada usando o trado Uhland, cujo cilindro tinha o volume de 279,5 cm³. A densidade de raízes foi obtida pela divisão da matéria seca de raiz por volume de solo amostrado transformado para kg m⁻³. Para o teste de infiltração foi utilizado um litro de água, e posteriormente foi medida a profundidade máxima de infiltração (Z_{máx}) em cada seção monitorada.

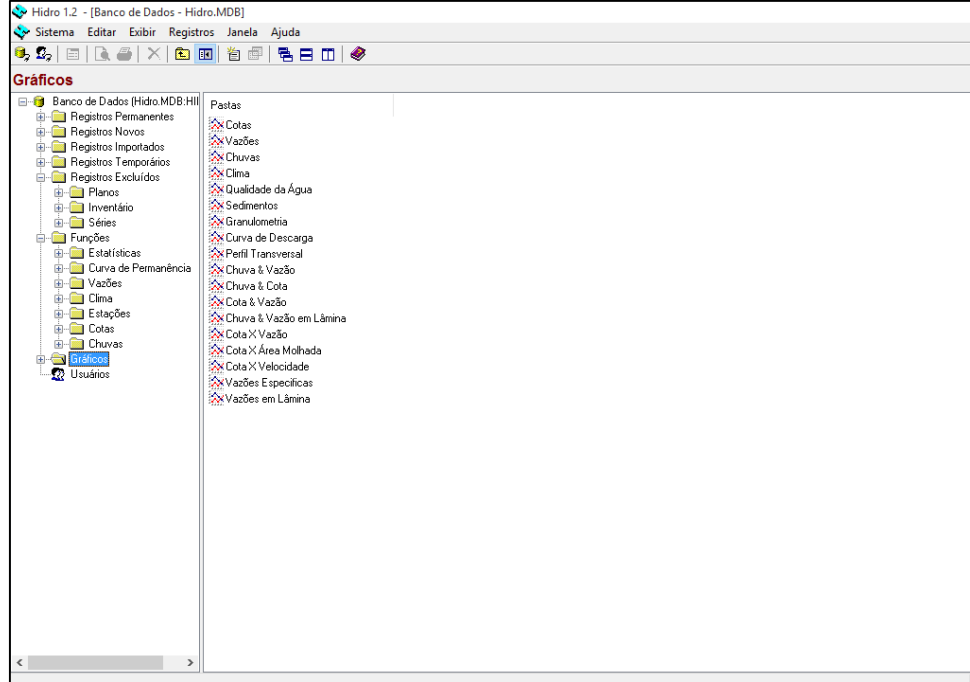
4.5.3 Dados pluviométricos e fluviométricos

Os dados referentes a precipitação e vazão do rio na área em estudo foram obtidos através do Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB), disponível no endereço eletrônico: <http://hidroweb.ana.gov.br/>.

Os dados de chuvas foram extraídos da Estação Pluviométrica (537041) localizada na sede do município de Quixeré e monitorada FUNCEME, e a Estação Fluviométrica (36760000) que fica localizada na área de estudo, a mesma é monitorada pela CPRM.

Para a manipulação dos dados foi utilizado o *software* Hidro 1.2, desenvolvido pela Agência Nacional de Águas (ANA), facilitando a análise dos dados com a geração de gráficos e planilhas (Imagem 23).

Figura 23 – Interfase do software Hidro 1.2



Fonte: ANA, 2015.

4.5.4 Análise Estatísticas dos Dados

Com os dados das perdas de solo (PS) e precipitações (P) acumuladas, ajustou-se os dados ao modelo sigmoidal proposto por Maia *et al.* (2009), com a equação 6, com PS_{max} (perda de solo máxima), α e n os parâmetros do modelo. A significância dos coeficientes foram testados pelo “teste t” à 5% de probabilidade.

$$PS = PS_{max} - \frac{PS_{max}}{1 + (\alpha \cdot P)^n} \quad (\text{Eq. 6})$$

A velocidade da perda de solo para o período estudado foi calculada baseado nas taxas de perda de solo (TPE) em função da precipitação máxima na taxa de solo (PE_{max}), conforme a equação 7.

$$TPE = \frac{PE_{max} \cdot \alpha^n \cdot P^{n-1}}{[1 + (\alpha \cdot P)^n]^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

A precipitação máxima na taxa de erosão (PE_{max}) foi determinada baseado na equação 8

$$PE_{max} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^{1/n} \quad (\text{Eq. 8})$$

Para a comparação da perda de solo, densidade de raízes e infiltração de água dos três grupos de áreas (AC, APC e AD), as médias foram comparadas pelo teste “*t student*” a 5% de probabilidade.

4.6 SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO

Esta etapa consistiu em duas análises multitemporais na área em estudo. A primeira consistiu na evolução dos processos de uso e ocupação do solo, e a segunda buscou avaliar a migração do canal fluvial. Para isto foram utilizadas as ferramentas ligadas as geotecnologias, assim como o uso de imagens de satélites.

4.6.1 Análise Multitemporal do Uso e Ocupação do Solo

A análise multitemporal do uso e ocupação do solo procedeu-se em três fases: preparação da cartografia de base e aquisição de imagens digitais; processamento das imagens digitais e mapeamento temático; e por último trabalho de campo para checagem da chave de interpretação utilizada.

Na primeira fase foi realizado uma busca dos principais materiais cartográficos preexistentes da Sub-bacia do Baixo Jaguaribe e do município de Quixeré, em arquivos digitais, formato *shapefile* (.shp), sendo estes o limites municipais (IPECE, 2010), e bacias e sub-bacias hidrográficas do Ceará (SRH,2008).

A análise multitemporal da área em estudo utilizou-se de imagens orbitais dos sensores Landsat 5 com data de 09/08/1989 e composição de bandas 7R,4G,2B; e imagens do sensor Landsat 8 de 24/08/2014 e composição de bandas 7R,5G,3B. A escala utilizada nesta análise foi de 1:65.000. As imagens foram disponibilizadas gratuitamente pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), através do endereço eletrônico: <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

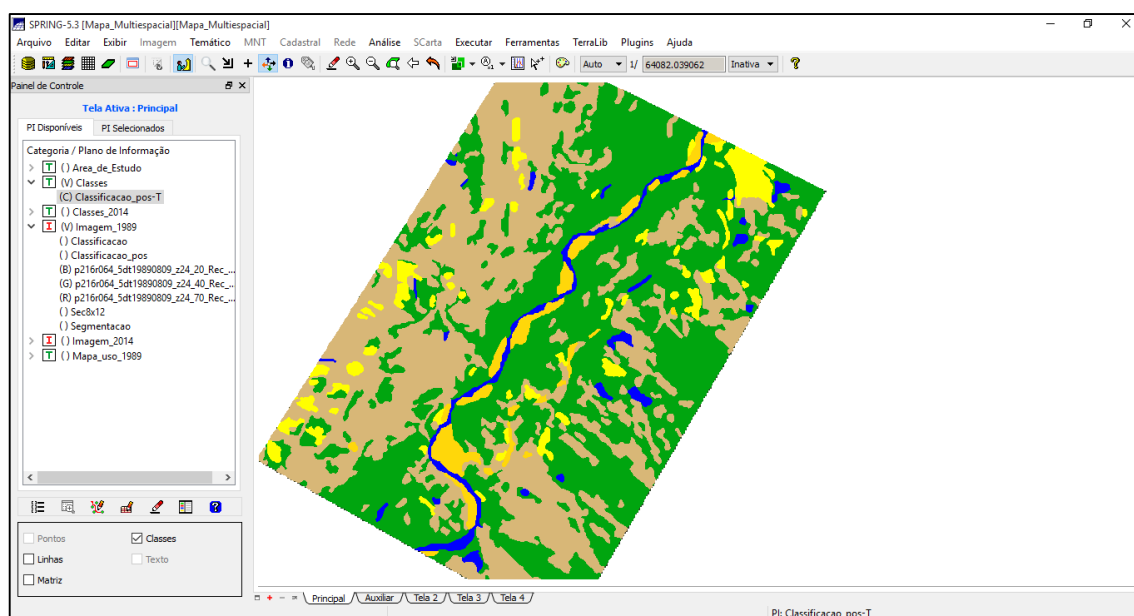
Na segunda fase foram realizadas algumas técnicas básicas do Processamento Digital de Imagens (PDI), sendo realizado o recorte e registro de imagens, realce de contrastes, classificação e geração de mapas temáticos. Para realização de tais procedimentos foi utilizado o software SPRING na versão 5.3.

Após delimitar a região de interesse, as imagens Landsat-5 e Landsat-8 foram recordadas e em seguida passaram pelo processo de georreferenciamento ou registro de imagem. Este procedimento refere-se à associação das imagens às coordenadas geográficas correspondente ao espaço real de um dado sistema de Projeção e Coordenadas. Desta forma foi utilizado uma imagem já registrada (GEOCOVER) para

servir como referência para o georreferenciamento das imagens adquiridas. Logo depois as mesmas passaram pela técnica de realce de contraste de imagens.

Depois dos procedimentos descritos anteriormente, foi realizado a segmentação da imagem pelo método de crescimento de regiões, e posteriormente, a classificação supervisionada por regiões que seguiu cinco etapas: sobreposição de bandas; definição das classes de mapeamento; escolha das amostras de treinamento; aplicação do algoritmo de classificação e; edição da classificação (Figura 24).

Figura 24 – Classificação de imagens e confecção de mapa de uso e ocupação no *software* Spring 5.3.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Foram determinadas seis classes de usos sendo: recursos hídricos, perímetro urbano, agricultura, vegetação, bancos de areia e pastagem. O algoritmo de classificação utilizado foi o *Bhattachartya* com limiar de aceitação de 99%. Em seguida realizou-se a edição vetorial da imagem classificada.

Após a etapa de classificação foram gerados dois mapas de uso e cobertura vegetal, correspondendo aos anos de 1989 e 2014, assim como a quantificação das classes de uso, para confecção dos mapas foi utilizado o *software* ArcGis 10.1 (Licença Universitária).

As classes de mapeamento foram checadas em trabalhos de campo para reconhecimento, a partir de registro fotográfico e tomada de pontos de controle com o uso de aparelho GPS (Sistema de Posicionamento Global).

4.6.2 Análise Multitemporal da Dinâmica do Canal Fluvial

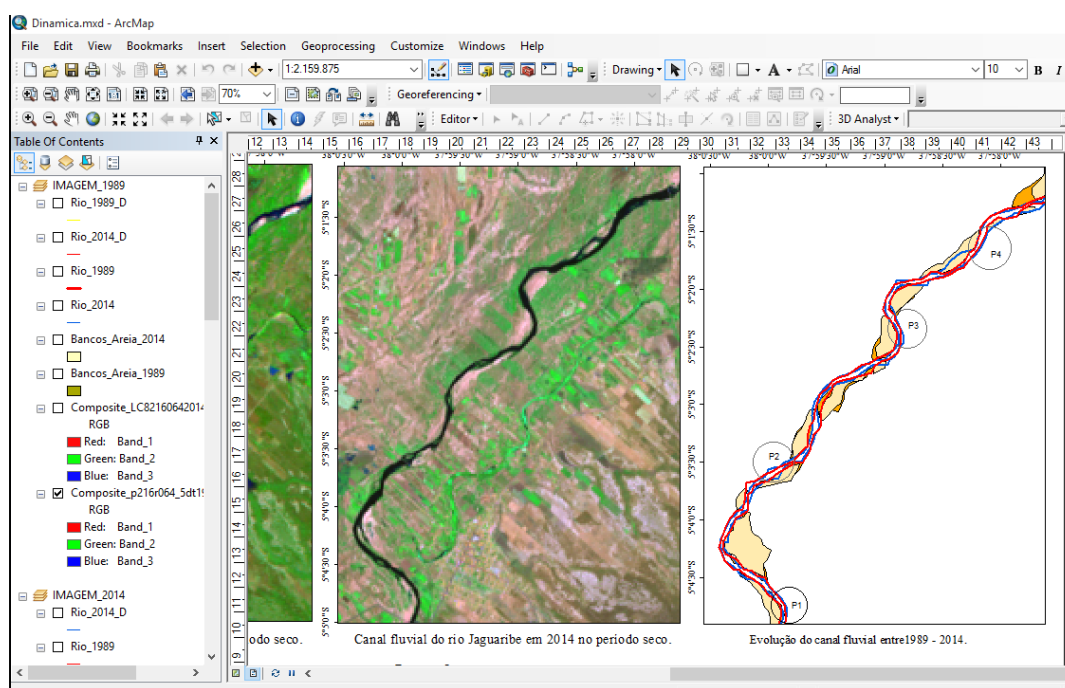
Para a realização da análise multitemporal da dinâmica do canal foram utilizadas as mesmas imagens orbitais (Lansat-5/1989 e Landsat-8/2014) utilizadas para geração dos mapas temáticos de uso e ocupação do solo. A composição de bandas também foram as mesmas, ou seja, Landsat-5 composição 7R,4G,2B e Landsat-8 composição 7R,5G,3B.

O *software* ArcGis 10.1 foi utilizado para a realização desse trabalho. Para isto foi criado dois arquivos digitais do tipo *shapefiles*, através das imagens orbitais Landsat-5/1989 e Landsat-8/2014.

A geração dos arquivos digitais se deu a partir das ferramentas do ArcMap presentes no *software* ArcGis 10.1, isto possibilitou a identificação do canal do rio nos anos de 1989 e 2014, a partir das imagens orbitais, posteriormente, foi criado os *shapefiles* do canal para o anos de 1989 e 2014. Logo após as etapas descritas os dois arquivos foram sobrepostos no ambiente SIG (*software* ArcGis 10.1). Isto facilitou a compreensão da evolução do canal fluvial no período avaliado que corresponde a 25 anos, assim como estimar o recuo em alguns pontos do rio (Figura 25).

A grande dificuldade deste tipo de análise é encontrar imagens de boa qualidade e do mesmo período do ano, pois se isto não for observado as informações do comportamento do canal podem ser distorcidas.

Figura 25 – Análise da evolução do canal fluvial do rio Jaguaribe em ambiente GIS (*Software* Arcgis 10.1).



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

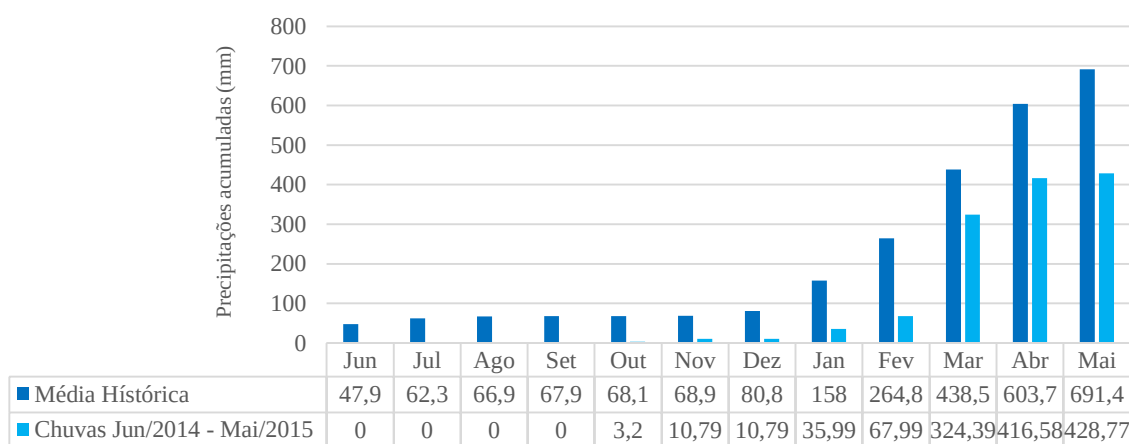
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 FATORES CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS

A precipitação é um dos fatores meteorológicos que apresenta grande influência nos processos de erosão de margens. A experiência no rio Jaguaribe mostrou uma relação importante entre a quantidade de chuvas e a taxa de erosão marginal.

A pesquisa estendeu-se por 12 meses e abrangeu dois períodos climáticos, uma estação de estiagem prolongada (junho de 2014 a janeiro de 2015) e uma quadra chuvosa (fevereiro a maio de 2015). Verifica-se no gráfico 1 as médias históricas de cada mês avaliado e a distribuição das chuvas no período de monitoramento.

Gráfico 1- Média histórica acumulada mensal das precipitações no município de Quixeré e as chuvas acumuladas observadas no período de monitoramento (Julho/2014 e Maio/2015).



Fonte: Adptado FUNCEME, 2015.

Conforme o gráfico 1, a quadra chuvosa que representa os meses de fevereiro, a maio, apresentou valores de chuvas acumuladas abaixo da média histórica que é de 691,4 mm, e o observado foi apenas de 428,77 mm. O mês de março foi o que apresentou chuvas bem acima da média histórica. Vale ressaltar que o ano de 2015 foi o quarto ano consecutivo com chuvas irregulares, inferior à média histórica, tanto para área em estudo como para todo o território cearense.

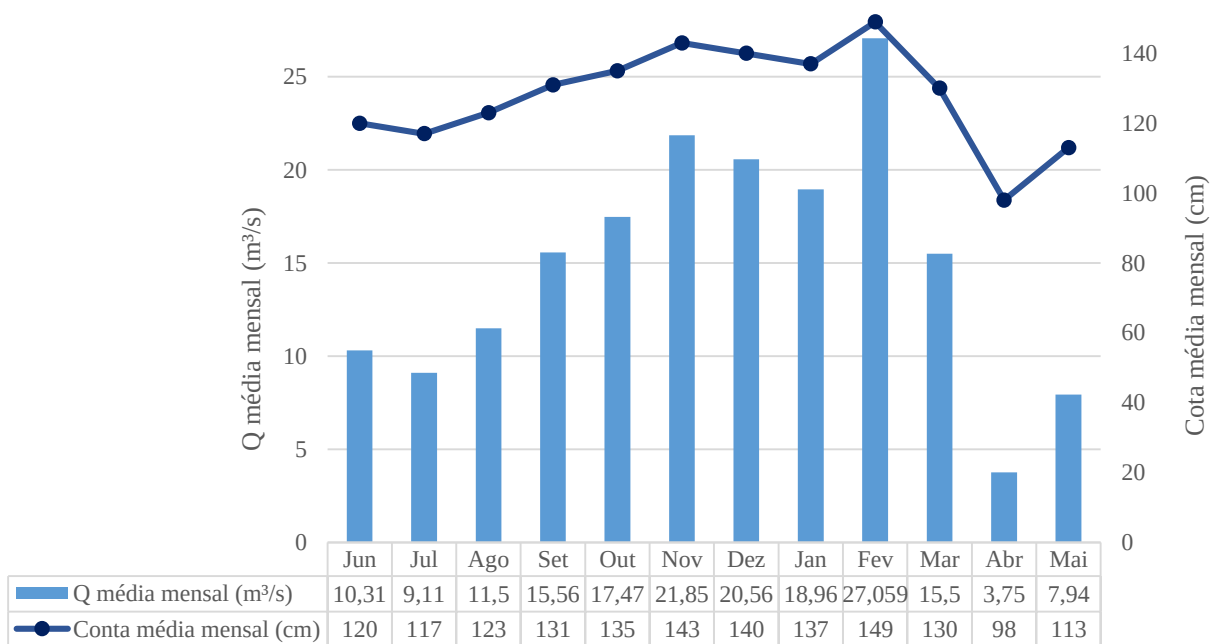
A variação diária do nível de água de um rio é considerada um dos fatores mais importantes a serem avaliados nos processos de erosão de margens. Esta variação controla a atuação das forças de origem fluvial sobre os materiais que constituem as margens. Tais forças são representadas pelas correntes e ondas (FERNANDEZ, 1990).

A ação erosiva das correntes atua diretamente na base das margens, gerando grandes desmoronamentos subaquosos os quais originam o descalçamento das partes superiores da margem. Em relação as ondas que são formadas pela ação dos ventos,

desempenham um poder abrasivo sobre as margens, modificando as suas características morfológicas, através do solapamento do barranco e, conseqüentemente, ocasionando o desmoronamento da sua parte superior. A magnitude da incidência das ondas estão relacionadas à direção dos ventos, desta forma, margens que apresentam suas faces voltadas na direção dos ventos são as mais vulneráveis a tal evento (FERNANDEZ, 1990).

No presente trabalho foram utilizados apenas dados referentes às variações das vazões e do nível do rio Jaguaribe (Gráfico 2). Os dados foram obtidos da Estação Fluviométrica - 36760000, localizada no município de Quixeré, a mesma é monitorada pela CPRM.

Gráfico 2 - Vazões e cotas médias mensais do rio Jaguaribe no período de junho de 2014 a maio de 2015.



Fonte: ANA e CPRM, 2015.

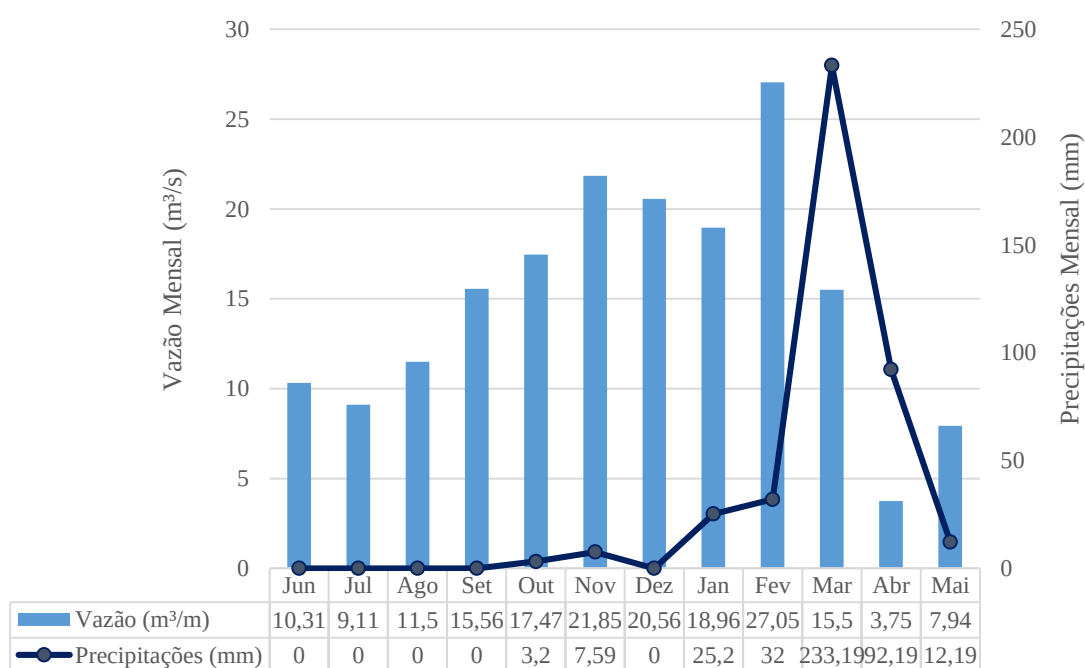
Como podemos observar pelo gráfico 2, o nível do rio está condicionado as suas vazões, ao longo do período de estudo as vazões e o nível do rio apresentaram algumas oscilações, como no mês de fevereiro que apresentou vazão média de 27,06 m³/s e o nível médio de 143 cm, já no mês de abril exibiu vazões muito reduzidas com média de 3,75 m³/s, e conseqüentemente, foi o mês de menor nível médio do rio, sendo este de 98 cm.

Confrontando as vazões com as precipitações observadas na área em estudo (Gráfico 3), percebeu-se que as vazões do rio Jaguaribe não aumentaram com as

precipitações. Isto é uma característica dos rios, ou seja, aumentarem suas vazões no período de chuvas e reduzir significativamente, ou mesmo chegar a zero na época de estiagem.

No período de estudo, notou-se que as maiores vazões ocorreram nos meses com menos chuvas (período de estiagem), já as menores vazões foram notadas nos meses de maiores precipitações. Tal fato é explicado devido o trecho do rio em estudo apresentar suas vazões controladas pelo Açude Castanhão.

Gráfico 3 - Vazões e precipitações mensais para o período de monitoramento.



Fonte: FUNCEME e CPRM, 2014.

Em estudos realizados por Casado *et al.* (2002) no rio São Francisco, que apresenta suas vazões controladas por barragens, também foi observado que as vazões no período de maior pluviosidade não revelaram aumentos.

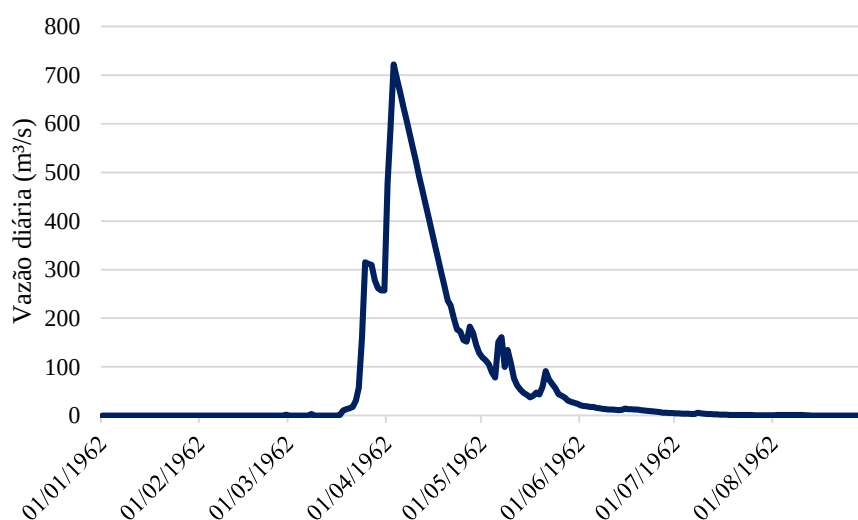
Cavalcante e Cunha (2011), em estudos na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, constataram que a partir da construção do Açude Castanhão em 2002, as vazões máximas do rio Jaguaribe passaram a ser menos vivenciadas. Já as vazões mínimas passaram a ser frequentes durante o ano todo, não sendo mais observado vazões “zero”.

Desta forma, avaliar erosão de margens em rios controlados por barragens apresenta-se como um grande desafio, pois as condicionantes naturais que atuam no processo de recuo de margens (nível e velocidade da água, vazão, transporte de sedimentos) podem ser intensificadas ou minimizadas pela regularização das vazões.

Nesta perspectiva, podemos afirmar que os reservatórios podem atuar de três maneiras nos processos de erosão de margens, em particular em rios semiáridos. Primeiramente, os reservatórios podem reduzir a erosão das margens no período chuvoso, pois as vazões do rio podem ser controladas no intuito de armazenar água ou controle de enchentes, fazendo com que as precipitações sejam dominantes nesta situação; no segundo podem intensificar a erosão no período chuvoso com a liberação de água; e terceiro os processos de erosão passam a não serem concentrados apenas no período chuvoso (onde apresenta os maiores picos de erosão), passando a ocorrer em outros períodos do ano, decorrentes da liberação de água.

O gráfico 4 apresenta as vazões do rio Jaguaribe no ano de 1962, precisamente, na estação fluviométrica do Peixe Gordo (36390000), localizada no município de Tabuleiro do Norte, a montante da área de estudo. Neste período, o Açude Castanhão não era construído, e o Açude Orós acabara de ser concluído. Ambos contribuem atualmente para a regularização das vazões do rio Jaguaribe, principalmente, o Açude Castanhão que regulariza as águas no médio e baixo curso do rio.

Gráfico 4 - Comportamento das vazões do rio Jaguaribe no município de Tabuleiro do Norte no ano de 1962.



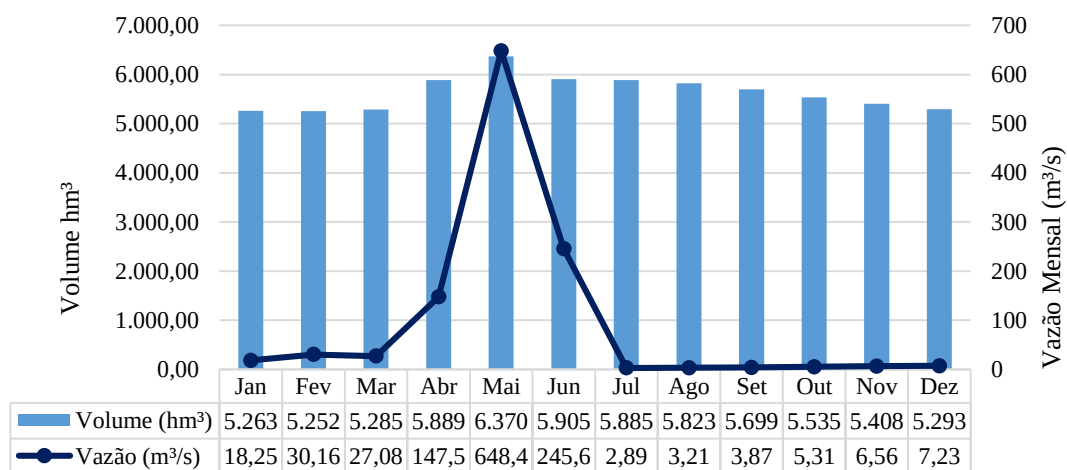
Fonte: CPRM, 2015.

Conforme o gráfico, as vazões do rio Jaguaribe no período em questão (1962) eram condicionadas diretamente pelas precipitações, ou seja, na quadra chuvosa as vazões máximas eram predominantes, e no decorrer do ano com a ausência das chuvas, as vazões eram bastante reduzidas atingindo a marca “zero”. Isto reforça o que foi relatado

anteriormente sobre a função dos reservatórios no comportamento das vazões, e consequentemente no nível do rio.

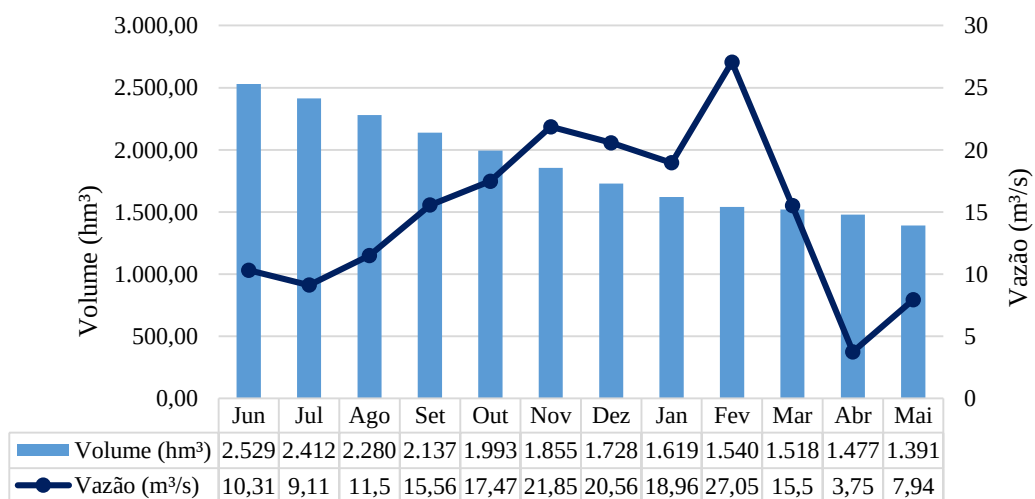
A gestão dos recursos hídricos em regiões semiáridas deve ser encarada como um grande desafio para os administrados e usuários, pois a instabilidade do clima dificulta a garantia hídrica em abundância por períodos prolongados. Em eventos de seca, por exemplo, a gestão da água deve ser ainda mais planejada nestas regiões, para manter por mais tempo a utilização do recurso hídrico, e assim garantir seus usos múltiplos. Os gráficos 5 e 6 representam, respectivamente, a relação do volume do Açude Castanhão com a vazão mensal do rio Jaguaribe para os anos de 2009 e para o período da pesquisa (junho/2014 a maio/2015).

Gráfico 5 - Relação do volume do Açude Castanhão e a vazão do rio Jaguaribe no trecho em estudo - 2009.



Fonte: COGERH e CPRM. 2015.

Gráfico 6 - Relação do volume do Açude Castanhão e a vazão do rio Jaguaribe no trecho em estudo – 2014- 2015.



Fonte: COGERH e CPRM. 2015.

Como podemos observar no ano de 2009, que apresentou chuvas muito acima da média histórica, o Açude Castanhão dispunha de 80% da sua capacidade. No referido ano as vazões médias do rio Jaguaribe tiveram picos elevados nos meses de abril (147,5 m³/s), maio (648,4 m³/s) e junho (245,6 m³/s). Já nos meses posteriores, que é considerada a estação de estiagem, foi observado vazões abaixo dos 10 m³/s.

Já o gráfico 6 que representa o período de estudo, o volume do açude para o início do período de estiagem (junho) foi de menos de 40% da sua capacidade, e inicia a estação chuvosa (fevereiro) com um volume de apenas 22 %. Porém o comportamento das vazões quando comparadas ao ano de 2009, no que refere-se aos meses de menores precipitações (julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro) foram elevadas, apresentando como média mensal para tal período 15 m³/s enquanto que em 2009 registou-se apenas 4,84 m³/s.

É importante frisar que os anos de 2012, 2013, 2014 e 2015 caracterizaram-se como anos de baixas precipitações. Dessa forma não houve aumento do volume do reservatório e para dificultar a situação os principais centros de previsão climática em nível global mostram grande possibilidade de atuação do fenômeno El Niño⁴ em 2016. Se isto for confirmado poderemos ter novamente alterações no regime de chuvas, gerando mais um ano com precipitações abaixo da média e conseqüentemente, redução do volume do reservatório.

Diante disto, é necessário um planejamento maior sobre as vazões do rio, apesar de que a procura por água pelos diversos setores (consumo humano, irrigação, indústria, entre outros) aumentem nos meses de estiagem, é de fundamental saber que o racionamento do recurso hídrico é imprescindível em todos os períodos, principalmente, em anos secos.

5.2 USO E MAPEAMENTO DA COBERTURA DO SOLO

É de grande importância a análise e o mapeamento dos usos da terra na bacia hidrográfica, bem como a delimitação e análise das unidades de conservação que ocorrem na bacia, e dos aspectos socioeconômicos (ROSS, 2009).

Desta forma, o entendimento do uso e cobertura da terra permite contribuir para o planejamento ambiental das atividades humanas desenvolvidas dentro das bacias

⁴ O fenômeno El Niño é caracterizado pelo aquecimento anômalo das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial, com sua ocorrência pode reduzir as chuvas na região do Nordeste brasileiro.

hidrográficas. Estas atividades devem ser compatíveis com a dinâmica natural dos diferentes geoambientes que formam esta unidade de planejamento.

Neste aspecto foi realizado uma análise multitemporal da área de estudo, que apresenta como unidade geoambiental a planície fluvial do rio Jaguaribe. De acordo com Souza (2000), as planícies fluviais são formadas pela acumulação de sedimentos decorrentes de processos fluviais que atuaram ao longo do tempo geológico.

As planícies fluviais são ambientes historicamente usadas pelo homem para o desenvolvimento de suas atividades. Press et al. (2006), destacam que há cerca de 4 mil anos, as cidades começaram a ocupar as planícies fluviais de inundação ao longo do rio Nilo, no Egito, nas terras da antiga Mesopotâmia, entre os rios Tigres e Eufrates, na Ásia, ao longo do rio Indo, na Índia o Yangtze e Huang Ho (rio Amarelo) na China.

Neste contexto, também destacamos a região do vale do Jaguaribe, que nasceu e se desenvolveu as margens do rio Jaguaribe e de seus afluentes.

As ocupações das planícies estão relacionadas, diretamente, as suas potencialidades naturais, ou seja, solos férteis, disponibilidade hídrica, relevos planos, entre outras. Dessa forma, o ambiente fluvial passou por grandes alterações na sua dinâmica natural, decorrentes, principalmente, das diversas atividades humanas instaladas sobre ele ao longo da história das sociedades.

No âmbito das paisagens dos sertões semiáridos nordestinos, as planícies fluviais ocupam uma posição de destaque, não por terem uma grande área territorial, mas por apresentarem as melhores condições de solo e de abundância de água (SOUZA, 2000).

Para compreender os atuais usos da Sub-bacia do Baixo Jaguaribe foi necessário recorrer aos processos socioeconômicos instaurados ao longo da história desta região. Nesta conjuntura, o Baixo Jaguaribe teve sua ocupação marcada por diferentes atividades econômicas, tais como a pecuária que foi a principal atividade responsável pelo surgimento da região, pela agricultura de subsistência, o extrativismo da palha de carnaúba (para produção de cera) e a agricultura irrigada que predominam atualmente, graças as intervenções do Estado, com as construções dos Açudes que garantiu água nos rios durante o ano todo (perenização) e a implantação de grandes projetos públicos de irrigação, conhecidos por perímetros irrigados.

O mapeamento temático do Uso e Cobertura da Terra tomando por base os anos de 1989 e 2014 (Figuras 26 e 27), que contabiliza uma variação temporal de 25 anos, revelou que as atividades humanas intensificaram ao longo deste período sobre os recursos naturais da planície fluvial, principalmente, com a supressão da vegetação.

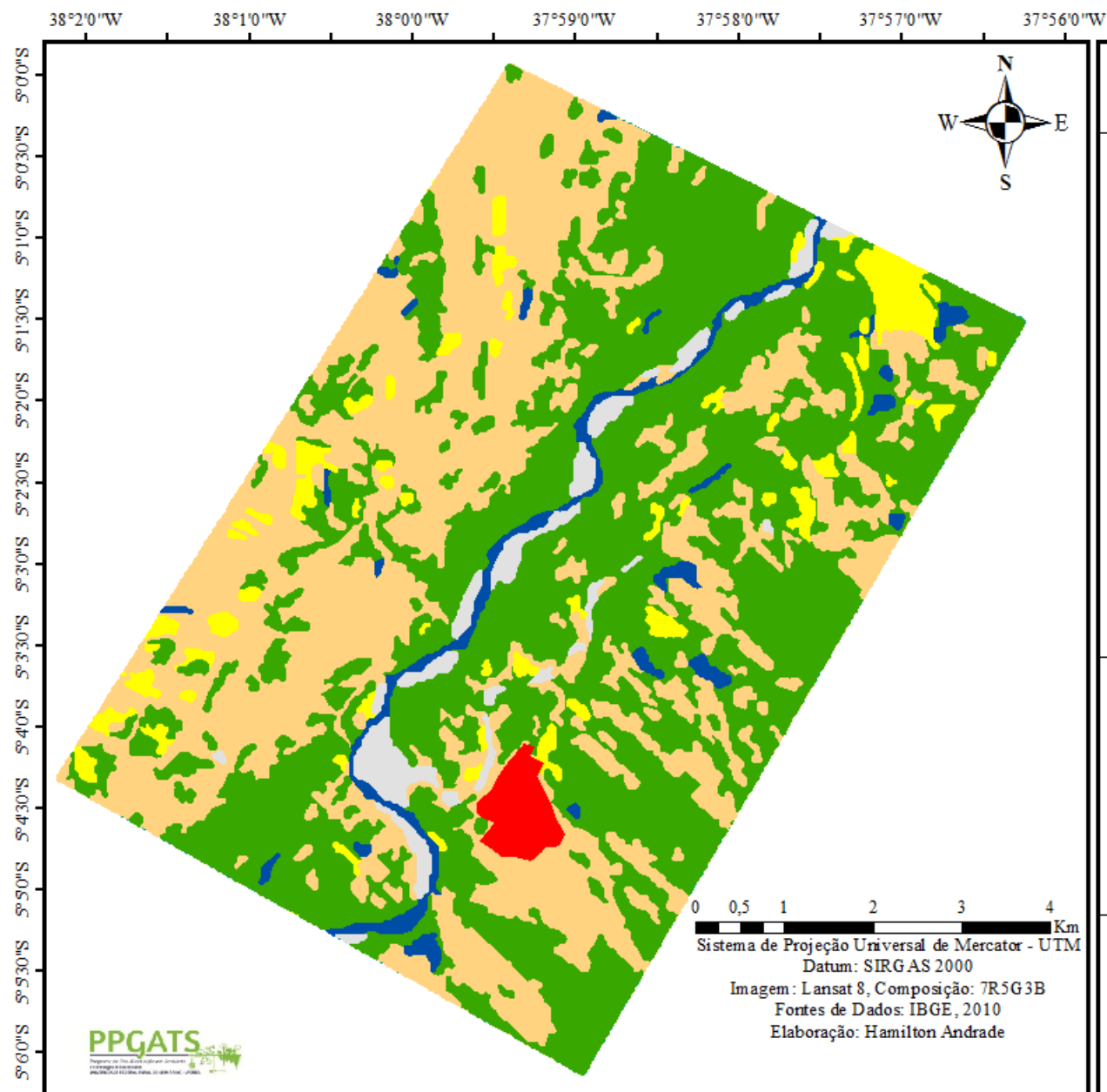
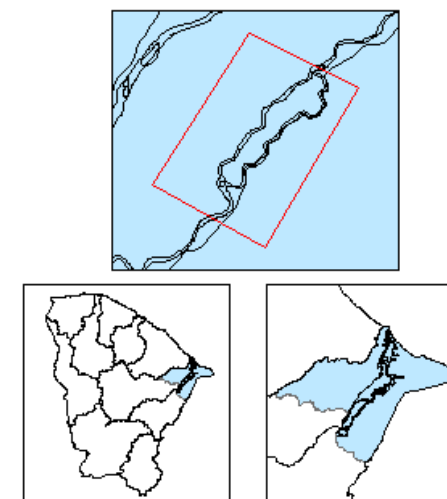


Figura 26 - Mapa de uso e cobertura do solo - 1989.

Localização



Legenda

- Área Urbana
- Agricultura
- Bancos de Areia
- Corpos Hídricos
- Pastagem
- Mata Ciliar

Convenções Cartográficas

- Área de Estudo
- Bacias Hidrográfica do Estado do Ceará
- Sub-bacia do Baixo Jaguaribe

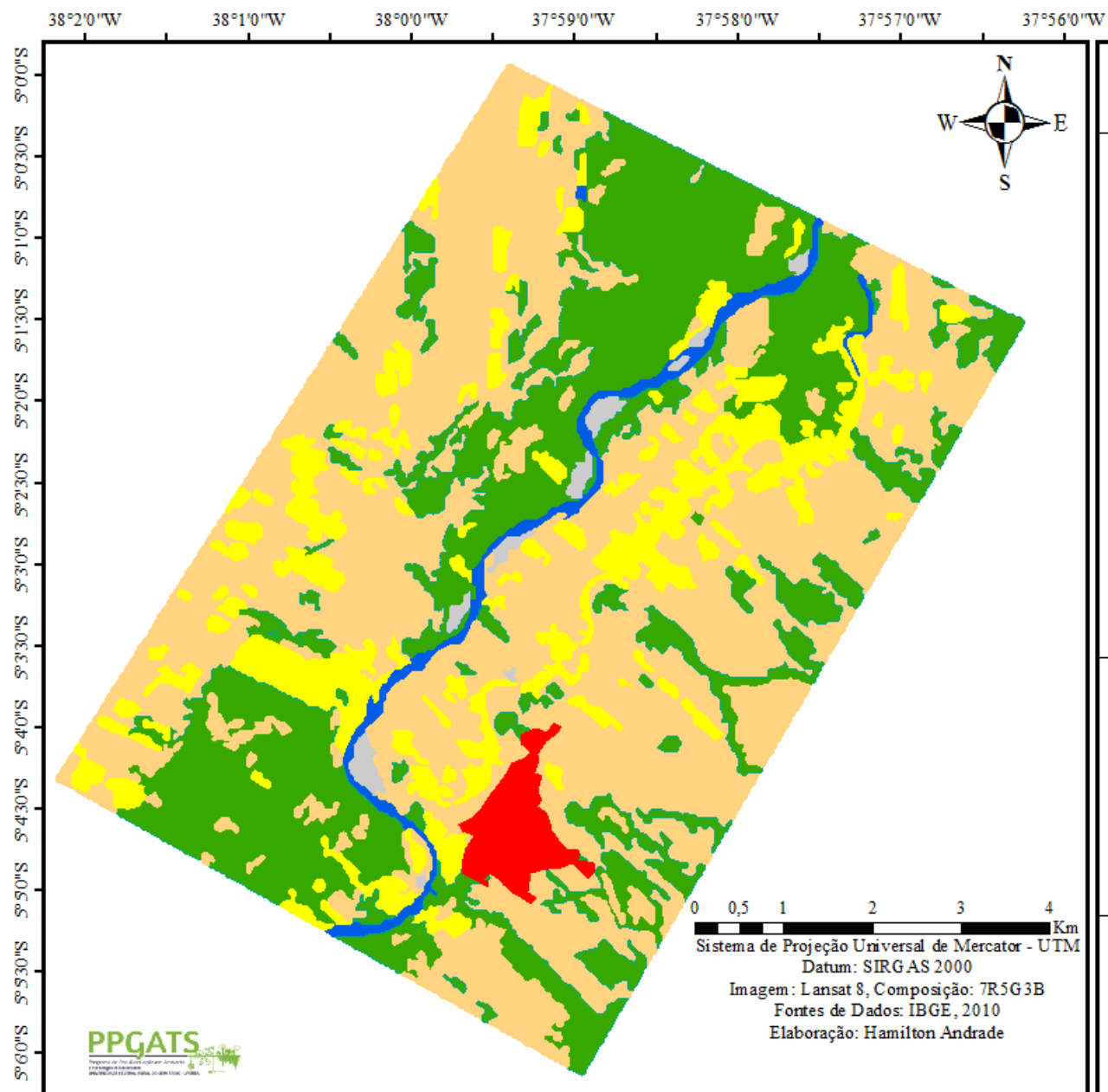
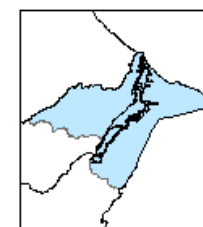
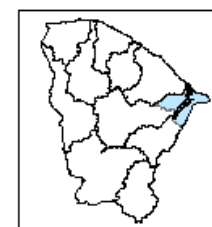


Figura 27 - Mapa de uso e cobertura do solo -2014.

Localização



Legenda

- Área Urbana
- Agricultura
- Bancos de Areia
- Corpos Hidricos
- Pastagem
- Mata Ciliar

Convenções Cartográficas

- Área de Estudo
- Bacias Hidrográfica do Estado do Ceará
- Sub-bacia do Baixo Jaguaribe

Com a remoção da vegetação, significa dizer que os processos de erosão de margens, podem ser acelerados, contribuindo decisoriamente em mudanças de ordem ambiental, social e econômica, afetando diretamente a população que habita as áreas adjacentes ao rio.

Cunha e Guerra (2011), alertam que os processos naturais, como formação do solo, lixiviação, erosão, deslizamentos, mudanças no comportamento da cobertura vegetal, alterações hidrológicas, entre outros, ocorrem no ambiente natural, sem a necessidade da intervenção humana. Porém quando o homem modifica estes processos, ditos naturais, os mesmos são intensificados de forma descontrolada, e suas consequências, muitas vezes são desastrosas para as sociedades humanas.

Foram determinadas para análise do uso e cobertura vegetal do solo para área de estudo seis classes de usos sendo estas: recursos hídricos, perímetro urbano, agricultura, vegetação, bancos de areia e pastagem.

Ao comparar as classes de uso/cobertura do solo entre os anos de 1989 e 2014 (Tabela 2), nota-se um crescimento da agricultura (8,55%) e das pastagens (12,79%), consequentemente, a vegetação sofreu uma redução de 19,22%. A área urbana apresentou um crescimento de 0,76%, e as classes denominadas de corpos hídricos e bancos de areia, apresentaram reduções discretas nas suas representações territoriais.

Tabela 2 - Distribuição absoluta (ha) e porcentagem de redução/ampliação (%) das classes de uso e ocupação do solo no período de 1989-2014.

Classes de uso e Ocupação do Solo	Área				Redução (R) ou Ampliação (A)	
	1989		2014			
	Há	%	ha	%	%	
Agricultura	289,07	4,43	846,85	12,99	8,55	(A)
Área Urbana	75,06	1,15	127,07	1,94	0,79	(A)
Bancos de Areia	191,56	2,93	62,27	0,95	1,98	(R)
Corpos Hídricos	194,30	2,98	137,59	2,11	0,86	(R)
Pastagem	2507,86	38,47	3342,13	51,26	12,79	(A)
Vegetação	3260,97	50,02	2002,90	30,72	19,29	(R)
Total	6518,84	100	6518,84	100	-	-

Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Seabra *et al.* (2015), em estudos sobre o uso e cobertura da terra realizado entre os anos de 1990 e 2009 na bacia do rio Taporé no Estado da Paraíba, obteve resultados semelhantes com o da área de estudo, com destaque para classe agropecuária que

apresentou um aumento de 41,43% e, a classe de vegetação que apresentou um decréscimo de 44,72%.

Já Guidolini *et al.* (2013), avaliado a dinâmica do uso e ocupação do solo no período de 1975 a 2010, no trecho da bacia do Rio Uberaba situado no município de Veríssimo, no Estado de Minas Gerais, perceberam resultados diferentes. No caso houve um ligeiro aumento na área de mata no ano de 2010 devido à recomposição vegetal, enquanto a pastagem tornou-se o principal uso, com o ganho de novas áreas onde substituiu a agricultura. Por sua vez, a agricultura apresentou as maiores perdas em área no período.

No caso específico do rio Jaguaribe, este crescimento das áreas agrícolas e das pastagens, podem estar relacionados, respectivamente, a perenização do rio pelo Açude Castanhão (construído em 2002) que possibilitou o desenvolvimento da agricultura irrigada na área da planície; e a extração de lenha para indústria ceramista fortemente presente na região; e a substituição da vegetação primária por pastos para serem utilizados na pecuária extensiva.

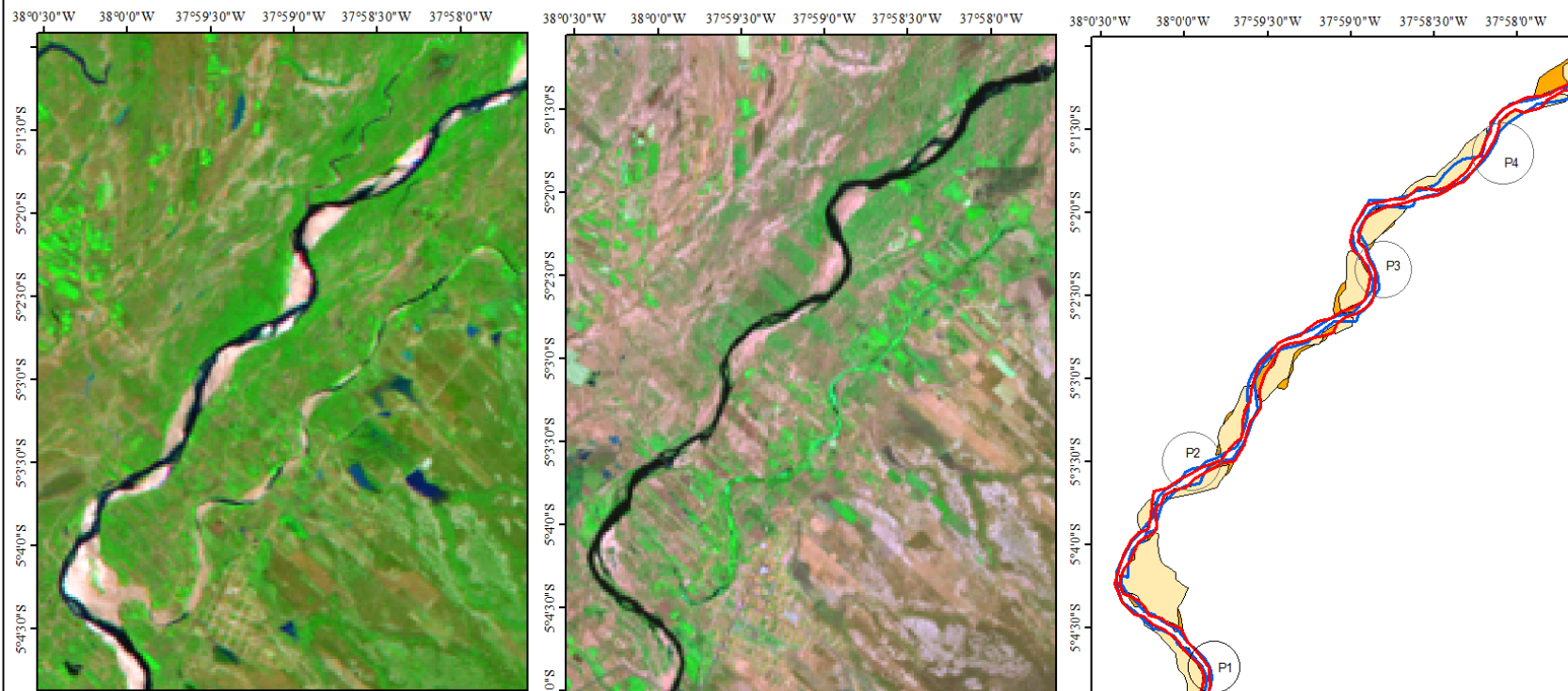
Do ponto de vista da ecodinâmica da paisagem, proposto por Tricart (1977), Souza (2000) descreve que as planícies se apresentam como ambientes de transição com tendências à instabilidade ambiental. Neste contexto, a vegetação situada próxima as margens de rios, são consideradas Área de Proteção Permanente (APP), conforme o Código Florestal brasileiro (Lei 12.651/2012), haja visto, a importância ambiental e a fragilidade a erosão deste ambiente.

Como podemos perceber com os dados do mapeamento, a área da planície fluvial em estudo, apresenta atividades que não respeitam a legislação ambiental. Em diversos pontos do rio é notória a degradação das Áreas de Proteção Permanente. Tal fato pode comprometer ainda mais a instabilidade das margens do rio, e consequentemente, aumentar e acelerar os processos de erosão de suas margens.

5.3 MUDANÇAS MORFOLÓGICAS DO CANAL FLUVIAL NO PERÍODO DE 1989 – 2014.

Com base em imagens orbitais dos anos de 1989 e 2014, foram analisadas as mudanças morfológicas do canal fluvial. O período avaliado foi de 25 anos com auxílio das técnicas de geoprocessamento de imagem, foi possível perceber que o trecho do rio avaliado ao longo deste período não apresentou grandes mudanças, porém em quatro pontos do rio, foram identificados processos mais evidentes de erosão de margem que contribuíram no seu alargamento (Figura 28).

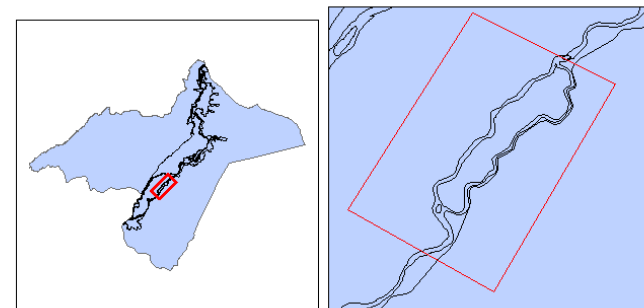
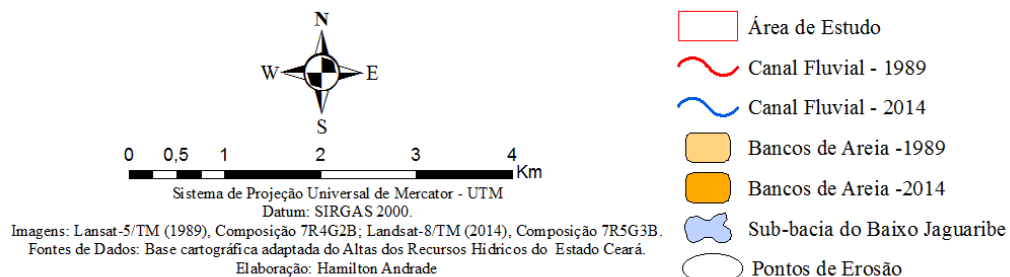
FIGURA 28 - MORFOLOGIA DO CANAL FLUVIAL NO TRECHO EM ESTUDO ENTRE OS ANOS DE 1989 - 2014



Canal fluvial do rio Jaguaribe em 1989 no período seco.

Canal fluvial do rio Jaguaribe em 2014 no período seco.

Evolução do canal fluvial entre 1989 - 2014.



Dos quatro pontos de maior erosão, apenas os pontos 1 e 4 estão localizados próximo as margens instrumentadas com pinos de erosão. Desta forma, foi correlacionado os dados obtidos pelo geoprocessamento com os obtidos pelos pinos de erosão. Com as técnicas de geoprocessamento foi possível realizar uma aproximação do calcula do recuo das margens para os quatro pontos. Também se avaliou o grau de conservação das margens para os anos de 1989 e 2014 (Tabela 3).

Tabela 3 – Recuo e estado de conservação das margens do rio Jaguaribe entre 1989 – 2014.

Ponto	Estado de Conservação		Margem	Recuo (m)	Erosão (m ano ⁻¹)
	1989	2014			
1	Degradada	Degradada	Esquerda	36	1,40
2	Degradada	Degradada	Direita	48	1,92
3	Parcialmente Conservada	Parcialmente Conservada	Direita	30	1,20
4	Conservada	Parcialmente Conservada	Direita	23	0,92

Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Os usos das margens foram identificados no mapeamento digital realizado, assim como nos trabalhos de campo para sua confirmação. Os pontos 1 e 2 apresentaram como uso principal, para ambos os anos de avaliação, atividades ligadas a agricultura. Já o ponto 3 apresentou alguns indícios de desmatamento, sendo o mesmo caracterizado como parcialmente conservado, e o ponto 4, no ano de 1989, apresentava-se com margem conservada. Porém no ano de 2014 ficou caracterizado como sendo uma área parcialmente conservada, devido algumas perturbações na vegetação, oriundas do desmatamento da vegetação ciliar.

Desta forma os pontos 1 e 2 foram os que obtiveram os maiores recuos de margens, diferente do ponto 4 que apresentou o menor recuo para avaliação. A junção vegetação ciliar e margem, apresentam uma combinação perfeita no controle da erosão marginal.

Tal fato também foi observado por Cavalcante (2012), utilizando metodologia semelhantes para analisar as mudanças no rio Jaguaribe em alguns trechos das Sub-bacias do Médio e Baixo Jaguaribe para os períodos de 1958-1988 e 1988-2010. Observou que em geral os trechos com vegetação quase inexistente, com ou sem áreas cultivadas mostraram em média taxa de recuo de até 7 m ano⁻¹, enquanto áreas com vegetação

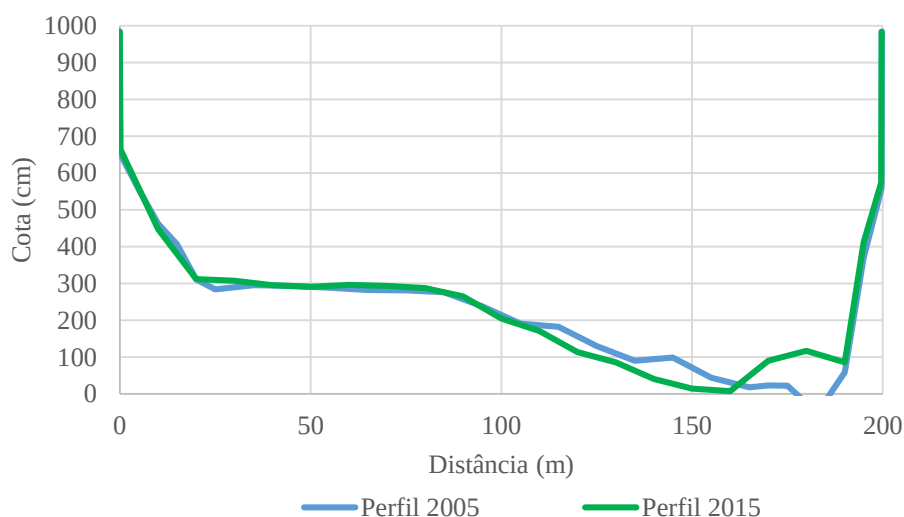
esparça foram de 2-3 m ano⁻¹. Já as margens parcialmente conservadas o recuo foi de 1,5 m ano⁻¹. A autora alerta que tais processos estão intimamente ligados ao regime fluvial de cada ano e a composição granulométrica das margens.

O ponto 1 apresentou um recuo de 1,4 m ano⁻¹, já a erosão obtida pelos pinos instalados próximo este ponto (seção Izídio), mostrou um recuo de 0,025 m ano⁻¹ (Tabela 2). Já o ponto 4 apresentou um recuo anual de 0,94 m, e recuo de 0,006 m obtidos pelos pinos de erosão da seção Sucurujuba I. Apesar dos dados dos pinos de erosão serem muito inferiores aos obtidos pelo geoprocessamento, isto mostra que o comportamento dos processos de erosão de margens é diferente no tempo e espaço. Os dados dos pinos foram obtidos em um ano de baixas precipitações e vazões, isto pode ter influenciado nas baixas taxas de erosão. Tal comportamento pode ser alterado em anos de elevadas precipitações e vazões.

Casado *et al.* (2002), afirmam que a erosão de margens apresenta uma importante distribuição temporal, ou seja, ela não ocorre de forma continua estando vinculada às magnitudes dos eventos climáticos (chuvas e ventos) e dos eventos hidrológicos (variações de vazão, cota e velocidade de fluxo) que ocorrem ao longo do ano.

Com base nos dados da Estação Fluviométrica - 36760000, avaliou as mudanças no perfil transversal do rio Jaguaribe entre os anos de 2005 e 2015, conforme o gráfico 7.

Gráfico 7 – Perfil transversal do rio Jaguaribe na Estação Fluviométrica – 36760000 entre os anos de 2005 – 2015.



Fonte: CPRM, 2015.

Como podemos constatar no gráfico 07, o perfil transversal do rio Jaguaribe entre os anos de 2005 e 2015 para a seção da Estação Fluviométrica apresentou mudanças na

forma do canal fluvial. Porém tais alterações são consideradas normais, fazendo parte da dinâmica sedimentológica realizada pelo trabalho do rio. Pelo gráfico também podemos observar que as mudanças ocorridas foram apenas dentro do canal, as margens não apresentaram mudanças. Vale ressaltar que esta análise é pontual e não se aplica a realidade do canal como todo, pois existem áreas com grande dinâmica morfológica.

5.4 PROCESSOS EROSIVOS

Os processos erosivos observados durante a pesquisa no trecho do rio Jaguaribe foram os seguintes: processos erosivos pluviais, decorrentes da ação das gotas de chuvas e do escoamento superficial das águas; processo de corrosão, que se dá pelo desgaste mecânico da margem, geralmente através das particular carregadas pelas água; desmoronamento por cisalhamento que ocorre quando bloco, devido ao solapamento da margem desmorona; e desmoronamento por basculamento que ocorre quando um bloco de terra perde equilíbrio e desmorona sem prévio solapamento acompanhado pela formação de fendas de tensão na superfície da margem.

Em todas as seções monitoradas o processo predominante foi o decorrente das ações das gotas de chuvas e do escoamento superficial das águas sobre as margens (Figura 29) que contribuíram para erodir as margens. Nas seções Água Fria e Sucurujuba I foram observados o processo de corrosão da base das margens (Figura 30). Já na seção Izídio foi presenciado o processo de desmoronamento por basculamento (Figura 31).

Figura 29 – Ação do escoamento superficial da água da chuva, formação de voçorocas na margem.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Figura 30 - Processo de Corrosão da margem.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Figura 31 - Processo de desmoronamento por basculamento.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Ressaltamos que ao longo do trecho em estudo os processos erosivos identificados apresentaram comportamentos diferenciados. Fernandez (1990), em estudos realizados no rio Paraná, identificou processos erosivos semelhantes ao do rio Jaguaribe como processo de corrosão, desmoronamento (por cisalhamento e por basculante) e o escorregamento rotacional que consiste num movimento rápido e de baixa duração, com volume de solo bem definido, cujo o centro de gravidade se desloca para baixo e para fora da margem, ao longo de uma superfície de escorregamento.

5.5 MAGNITUDE DA EROSÃO

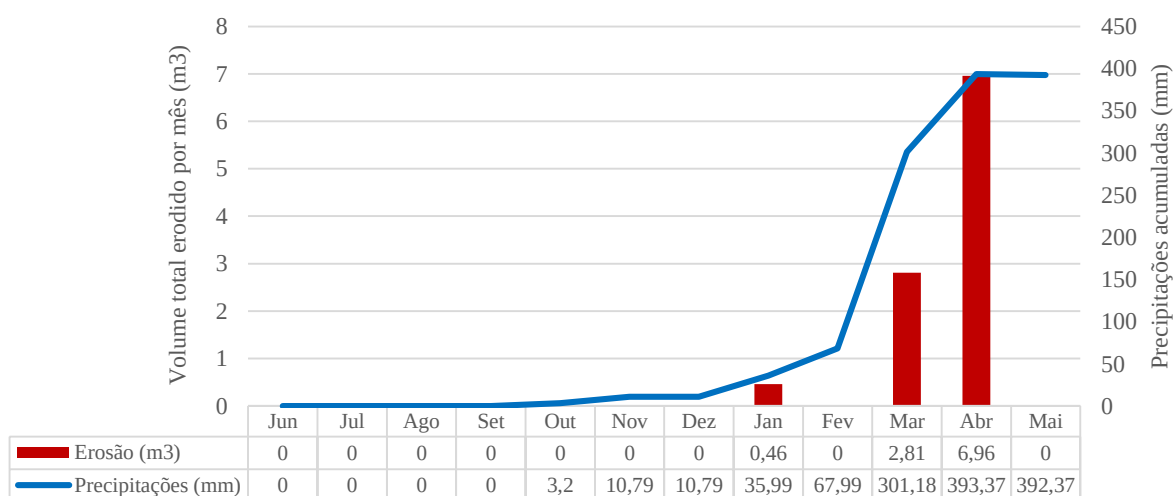
A erosão de margens, como já relatado neste trabalho, é um processo muito dinâmico, apresentando ampla distribuição espacial e temporal. Conforme Fernandez (1990), a distribuição da quantidade de material erodido pode variar notavelmente de um ponto a outra da margem. No que se refere a distribuição temporal, esta é descontínua sendo vinculada às magnitudes dos eventos climáticos (precipitações) e hidrológicos (enchentes), proporcionando oscilações na quantidade de volume erodido durante o ano.

Os trabalhos de monitoramento da erosão marginal realizados durante os doze meses da pesquisa revelaram que o principal agente atuante na erosão das margens do trecho do rio Jaguaribe, foi ação das águas das chuvas. Segundo Fernandez (1995), ação das águas das chuvas envolvem dois aspectos importantes nos processos de erosão de encostas, sendo estes a ação das gotas das chuvas e as águas do escoamento superficial.

Os processos erosivos decorrentes da ação das gotas de chuvas envolvem a desagregação das partículas do solo por impacto e o seu deslocamento por explosão. Já o escoamento superficial relaciona-se ao transporte dos sedimentos soltos ou desagregados através do fluxo turbulento (FERNANDEZ,1995).

Mesmo com as precipitações abaixo da média históricas para o período avaliado, as precipitações foram o principal mecanismo de perda de solo para as margens estudadas, apesar de que outros processos erosivos também foram observados no trecho em estudo, como abordado anteriormente. O gráfico 8, apresente o comportamento das precipitações acumuladas e o volume erodido total por mês, obtido pelo somatório das áreas avaliadas.

Gráfico 8 - Volume erodido total por mês nas áreas monitoradas e a precipitação acumulada para o período monitorado.

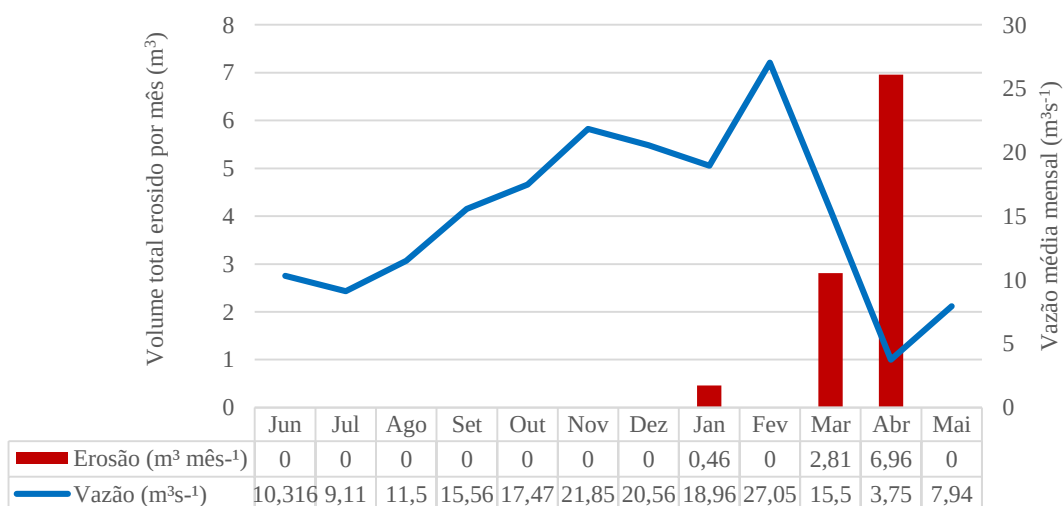


Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Conforme o gráfico 8, os processos de perda de margem passaram a ser observados, justamente quando se iniciou a quadra chuvosa. Durante os meses de estiagem não foi registrada erosão nas áreas monitoradas. Fernandes e Fulfaro (1993), em estudos no rio Paraná observaram comportamento semelhantes ao do rio Jaguaribe, ou seja, no período de estiagem a taxa de erosão em algumas margens mantiveram-se baixa, mas com a regularização das precipitações a erosão média aumentou consideravelmente.

As vazões e o nível do rio Jaguaribe durante o período de monitoramento apresentaram algumas oscilações, mas estes não foram suficientes para atuarem intensivamente na erosão das margens monitoradas, conforme o gráfico 9. Vale ressaltar que tais fatores hidrológicos são considerados um dos mais importantes no processo de erosão de margens.

Gráfico 9 – Comportamento das vazões mensais e o volume total erodido por mês nas áreas monitoradas.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Como já relatado anteriormente, os comportamentos das vazões não repercutiram de forma direta na erosão das margens do rio Jaguaribe para o período estudado. De acordo com a leitura do gráfico 9, o mês de abril que apresentou o maior volume total erodido para as áreas monitoradas, exibiu a menor vazão mensal. Por outro lado, também pode ser observado que no mês de fevereiro apresentou a maior vazão média mensal ($27,05 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), não sendo observado em nenhuma área volume erodido.

Como exposto, as chuvas foram o principal fator erosivo das margens para o período estudado. Relacionando as precipitações acumuladas com a perda de solo para as seções monitoradas, dispostas nas três áreas determinadas, ou seja, áreas conservadas,

áreas parcialmente conservadas e áreas degradadas. A tabela 4 representa os resultados obtidos pelo modelo aplicado, onde é possível perceber que modelo estimou satisfatoriamente a erosão, como pode ser observado pelos altos valores de R^2 .

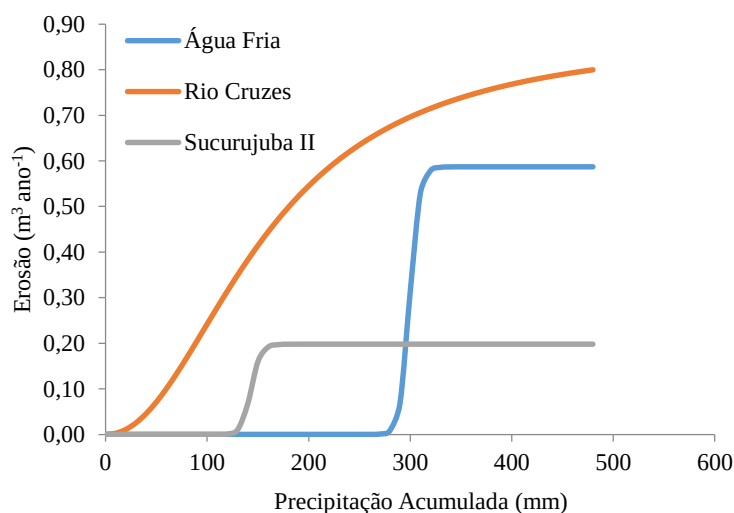
Os gráficos 10, 11 e 12, representam, a erosão acumulada em função da precipitação para as áreas consideradas conservadas, parcialmente conservadas e degradadas, respectivamente.

Tabela 4 - Parâmetros do modelo de regressão (PEmax, a e n), coeficiente de determinação, precipitação para erosão de 50% da máxima (P.E50%), precipitação na taxa de perda de solo por erosão máxima (P.TPEmax) e taxa máxima de perda de solo por erosão (TPEmax) para as áreas avaliadas.

	Conservada		Parcialmente Conservada				Degradada		
	Água Fria	Rio Cruzes	Sucurujuba II	Canelas II	Sinhã	Sucurujuba I	Izídio	Rio Eduardo	Canela I
PEmax	0,587	0,8765	0,198	0,206	0,09	0,76	6,066	0,87	0,686
a	0,00334	0,00633	0,00699	0,00346	0,0505	0,00334	0,00323	0,00327	0,00332
N	63,32	2,1054	30,32	52,56	37,82	47,79	71,01	67,06	78,43
R^2	0,9999	0,9966	0,9999	0,9999	0,9999	0,8816	0,9999	0,9999	0,9999
P.E50%	299,40	157,98	143,06	289,02	19,80	299,40	309,60	305,81	301,20
P.TPEmax	299,25	96,72	142,75	288,81	19,77	299,14	309,47	305,67	301,11
TPEmax	0,03	0,0037	0,01	0,01	0,04	0,03	0,35	0,05	0,04

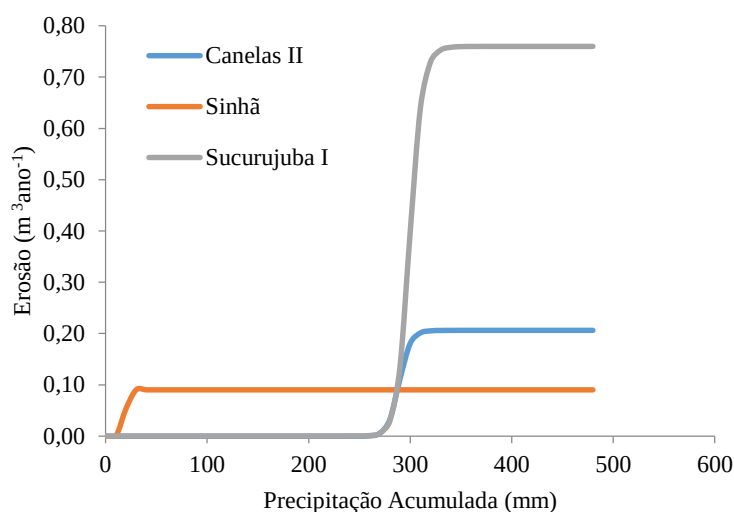
Fonte: Dados da pesquisa

Gráfico 10 – Erosão acumulada ($m^3 \text{ ano}^{-1}$) em função da precipitação (mm) nas áreas conservadas.



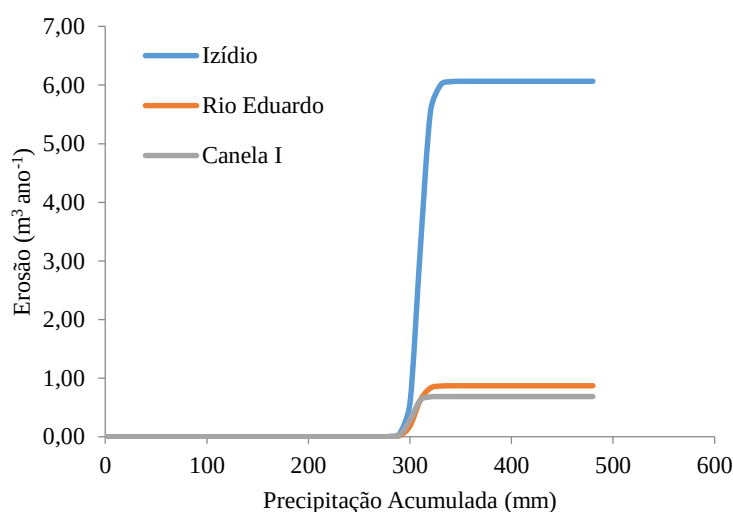
Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Gráfico 11 – Erosão acumulada ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$) em função da precipitação (mm) nas áreas parcialmente conservadas.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Gráfico 12 – Erosão acumulada ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$) em função da precipitação (mm) nas áreas degradadas.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Conforme os gráficos 10,11 e 12, a erosão foi maior nas áreas degradadas que apresentaram maiores volumes. Já a erosão nas áreas conservadas e parcialmente conservadas foram menores comparado a área degradada, apesar de que o volume erodido nas áreas consideradas conservadas tenha sido numericamente um pouco maior que nas áreas parcialmente conservadas. Isto está relacionado aos baixos valores obtidos na seção Sinhã que só perdeu $0,09 \text{ m}^3 \text{ano}^{-1}$, puxando a média para baixo.

Dentre as áreas degradadas a seção Izídio apresentou o maior volume erodido sendo este de $6,06 \text{ m}^3/\text{ano}$. Dentre as áreas conservadas, a seção Sucurujuba II, apresentou

o menor volume ($0,19 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$). Já na seção Sinhã, que apresenta características de área parcialmente conservada, observou-se a menor quantidade de material erodido para o período monitorado, sendo este de apenas $0,09 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$.

Em trabalhos realizados por Andrade e Cavalcante (2014) no rio Jaguaribe, entre os anos de 2012 e 2013, também foi observado que em margens com presença de vegetação apresentaram baixos volumes de solo erodido, porém nas margens com ausência de vegetação o volume erodido foi superior as margens vegetadas.

Carmo (2003), utilizando a metodologia dos pinos de erosão, em trabalhos realizados nas margens do canal Santa Amélia, localizado no Estado do Rio de Janeiro, percebeu que os pinos que apresentaram maiores recuos foram aqueles instalados onde a vegetação, em momento alguns não chegou a se desenvolver ou o fez de forma muito rarefeita.

O recuo das margens das áreas avaliadas para o período de junho de 2014 a maio de 2015, está representado pela tabela 5.

Tabela 5 - Recuo anual das áreas monitoradas durante os dozes meses de avaliação.

Tipo de Área	Seção	Recuo (cm ano^{-1})
Área Conservada (AC)	Água Fria	0,50
	Rio Cruzes	0,14
	Sucurujuba II	0,11
Área Parcialmente Conservada (APC)	Canela II	0,13
	Sinhã	0,06
	Sucurujuba I	0,63
Área Degradada (AD)	Izídio	2,52
	Rio Eduardo	0,25
	Canela I	0,47

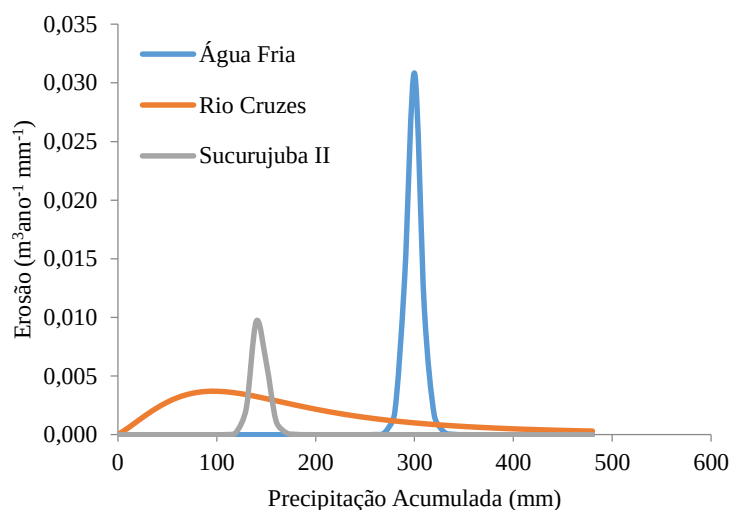
Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Como se pode observar na tabela 5, as áreas conservadas apresentaram menor taxa de recuo anual, quando comparadas as áreas parcialmente conservadas e as áreas degradadas. As áreas degradadas apresentaram um recuo médio anual de 1,08 cm. Já as áreas conservadas e parcialmente conservadas, apresentaram, respectivamente, recuo médio anual de 0,25 e 0,27 cm.

No que se refere ao comportamento da erosão ao longo do período de análise, ou seja, a velocidade de perda de solo, foram estabelecidas as taxas de perda de solo (TPE)

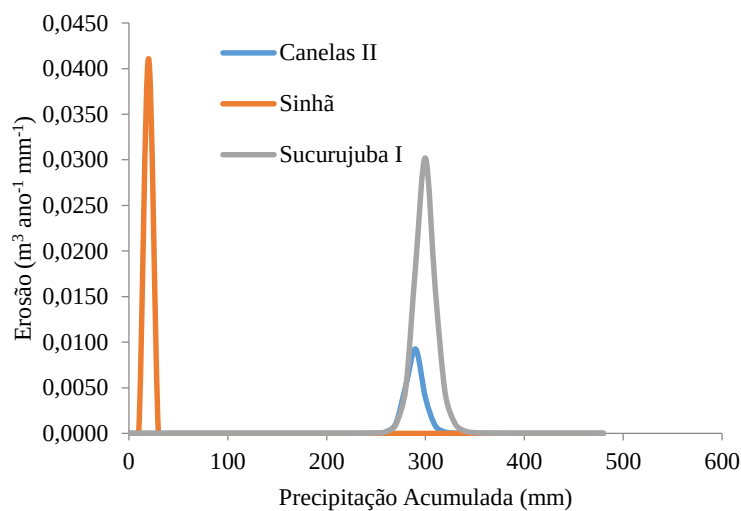
em função das precipitações. Os gráficos 13,14 e 15, apresentam as taxas de erosão nas áreas conservadas, parcialmente conservadas e degradadas.

Gráfico 13 – Taxa de perda de solo ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1} \text{mm}^{-1}$) em função da precipitação (mm) nas áreas conservadas.



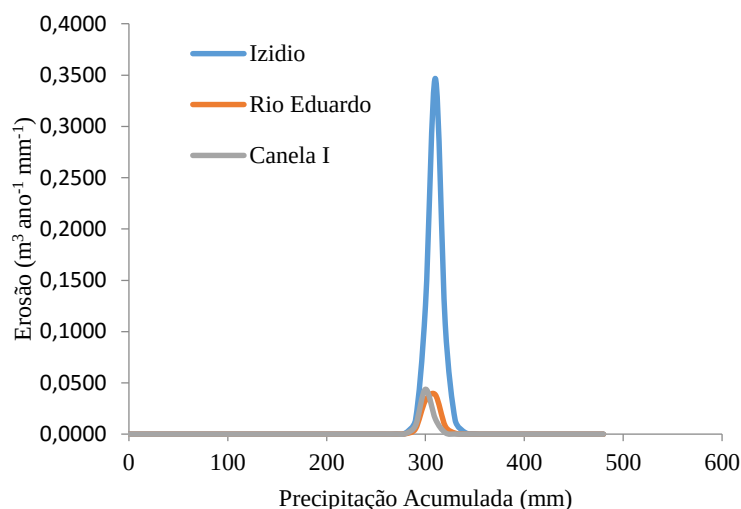
Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Gráfico 14 – Taxa de perda de solo ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1} \text{mm}^{-1}$) em função da precipitação em função da precipitação (mm) nas áreas parcialmente conservadas.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Gráfico 15 – Taxa de perda de solo ($\text{m}^3\text{ano}^{-1}\text{mm}^{-1}$) em função da precipitação (mm) em áreas degradadas.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

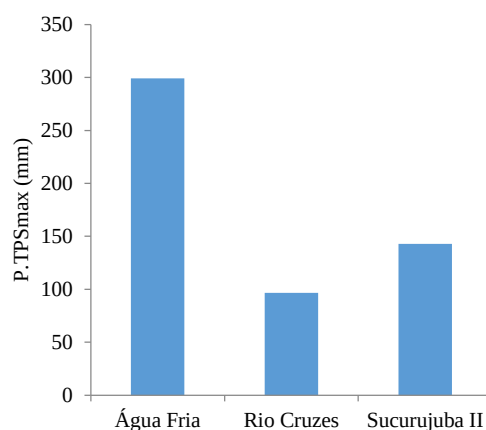
Conforme os gráficos 13,14 e 15, a taxa de perda de solo não é constante e variou durante o período analisado. As seções rio Cruzes (conservada) e Sinhã (parcialmente conservada) apresentaram comportamento diferentes, quando comparados as demais seções.

Conforme observado nos gráficos a erosão passou a ser observada com precipitações acumuladas acima de 100 mm, principalmente próximo aos 300 mm que concentrou os principais picos de erosão. Porém as seções Rio Cruzes e Sinhã, começaram a perder solo bem no início das precipitações, diferente das áreas degradadas onde observou-se que os picos erosivos foram muito semelhantes, se concentrando nas precipitações acumuladas próximo aos 300 mm.

Como a taxa de perda de solo não é constante durante ano, verificou-se que esta é nula no início, ou seja, no período de estiagem (sem chuva) e vai crescendo com o aumento das precipitações. Porém volta a diminuir no final do período avaliado, justamente, coincidindo com o início da estação seca, onde as precipitações vão sendo reduzidas.

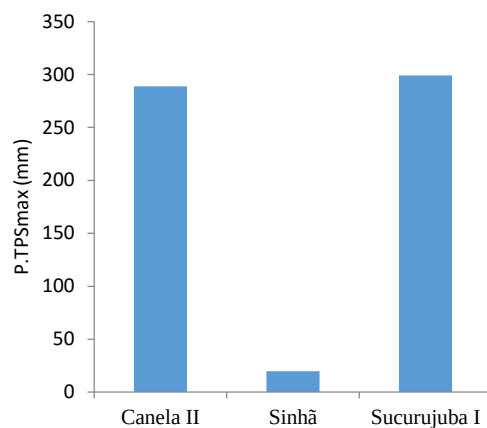
Desta forma a taxa de erosão apresentou-se lenta no início e no final do período avaliado, apresentando um ponto em que essa taxa é máxima. Com isto foi calculada a chamada precipitação na taxa de perda de solo por erosão máxima (P.TPEmax) para as áreas avaliadas, conforme os gráficos 16,17 e 18.

Gráfico 16 – Precipitação na taxa de perda de solo por erosão máxima (P.TPEmax) nas áreas conservadas.



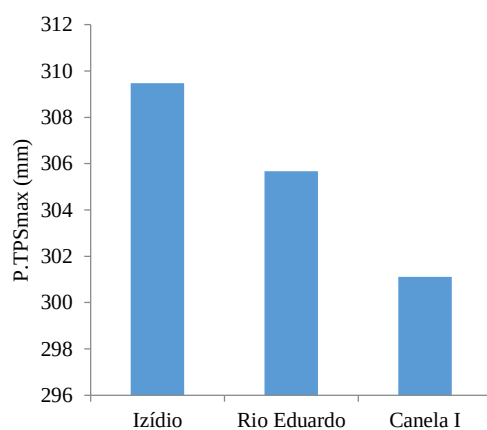
Fonte: Dados da pesquisa, 2015

Gráficos 17 – Precipitações na taxa de perda de solo por erosão (P.TPEmax) nas áreas parcialmente conservadas.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Figura 18 – Precipitações na taxa de perda de solo por erosão (P.TPEmax) nas áreas degradadas.



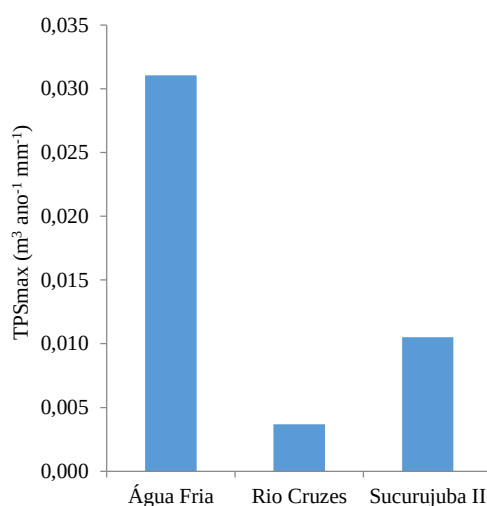
Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Como podemos observar nos gráficos 16,17 e 18, a precipitação na taxa de erosão máxima variou bastante nas áreas conservadas, parcialmente conservadas e degradadas. Nas áreas conservadas a maior precipitação foi de 299,25 mm na seção Água Fria, apresentando a menor precipitação na seção Rio Cruzes, 96,72 mm. Já nas áreas parcialmente conservadas a maior precipitação na taxa de erosão foi de 299,14 mm na seção Sucurujuba I e a menor precipitação foi na seção Sinhã de 19,77 mm. Nas áreas degradadas apresentou-se com maior precipitação 309,47 na seção Izídio e menor precipitação na seção Canelas I de 301, 11 mm.

Desta forma podemos perceber que as áreas conservadas e parcialmente conservadas apresentaram menores precipitações na taxa máxima de erosão, comparadas as áreas degradadas, porém o volume erodido nas áreas conservadas e parcialmente conservadas foi muito menor do que nas áreas degradadas, isto reforça o trabalho desempenhado pela vegetação na estabilidade das margens.

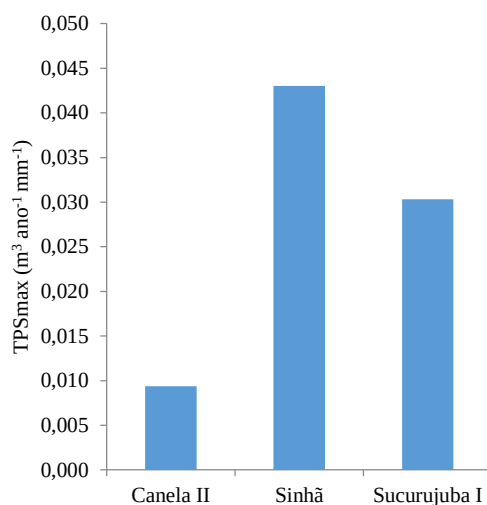
A taxa de perda de solo máximo (TPSmax) para o período avaliado foi considerada baixa, tal fato pode ser explicado devido as baixas precipitações na região, sendo considerado mais um ano de seca, assim como as baixas vazões e o baixo nível do rio Jaguaribe durante o período avaliado. Os gráficos 19, 20 e 21, apresentam a taxa máxima de perda de solo para as áreas monitoradas.

Gráfico 19 – Taxa de perda de solo máximo ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1} \text{mm}^{-1}$) nas áreas conservadas.



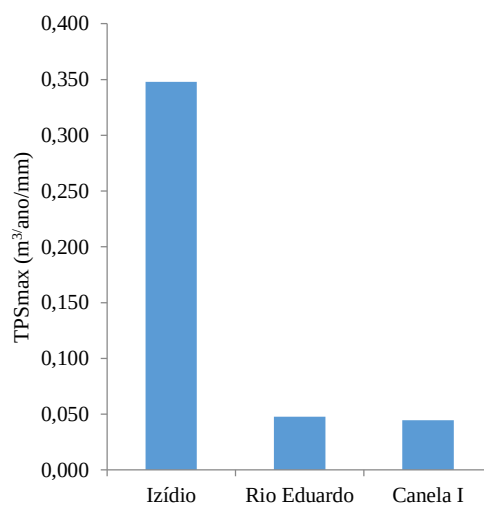
Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Gráfico 20 – Taxa de perda de solo máximo ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1} \text{mm}^{-1}$) nas áreas parcialmente conservadas.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Gráfico 21 - Taxa de perda de solo máximo ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1} \text{mm}^{-1}$) nas áreas degradadas.



Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Apesar dos baixos volumes apresentados, é importante frisar que os dados obtidos apresentam apenas a realidade de alguns pontos do rio. Além do mais como foi percebido, as áreas sem vegetação sofrem mais com a erosão. Ao longo do trecho monitorado foram identificados vários pontos em que vegetação ciliar foi completamente removida, aumentando a vulnerabilidade das margens aos processos erosivos, pois apesar de ser um processo natural, a erosão de margens pode ser acelerada pelos usos não planejados do solo.

Destacamos ainda que os dados de erosão foram obtidos em um ano considerado seco, ou seja, com precipitações abaixo da média histórica, o que leva a compreender que em períodos de chuvas acima da média, a taxa de erosão pode ser aumentada consideravelmente.

5.6 A VEGETAÇÃO CILIAR E OS PROCESSOS DE EROSÃO DE MARGENS

A vegetação desempenha um papel fundamental na estabilidade das margens fluviais, minimizando os efeitos dos processos erosivos, desencadeados pelos fatores externos e internos que atuam no canal fluvial.

A função das raízes é aumentar a resistência da margem aos processos de cisalhamento. Araújo *et al.* (2008), preconiza que o valor do sistema radicular nesse aspecto está sujeito a sua resistência e concentração, características de ramificações e distribuições espacial no solo. Já a resistência e a arquitetura das raízes, por sua vez, são regularizadas pelo tipo de planta e pelas características ambientais do solo.

Como forma de representar a importância da vegetação na estabilidade das margens foram determinadas a densidade de raízes nas áreas em estudo, assim como a taxa de infiltração de água no solo, conforme o índice proposto por Maia *et al.* (2014). A tabela 6, representa o comportamento da infiltração e a densidade de raiz nas áreas consideradas conservadas, parcialmente conservadas e degradadas.

Tabela 6 – Densidade de raízes (kg m^{-3}) e infiltração (cm) nas áreas conservadas, parcialmente conservadas e degradadas.

	Conservada			Parcialmente Conservada			Degradada		
	Água Fria	Rio Cruzes	Sucurujuba II	Canelas II	Sinhã	Sucurujuba I	Izídio	Rio Eduardo	Canela I
Z _{max} (cm)	9,20	10,20	11,60	5,50	7,40	11,80	6,10	4,80	5,70
D _{raiz} (kg/m^3)	4,0	2,44	5,86	0,51	1,29	2,58	0,30	0,34	0,20

Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Conforme os dados da tabela 6, as áreas conservadas apresentaram maior taxa de infiltração (Z_{max}), assim como os maiores volumes de densidade de raízes. As áreas parcialmente conservadas, também revelaram o mesmo comportamento das áreas conservadas. Já nas áreas degradadas como eram esperados, apresentaram os menores valores de densidade de raízes, e conseqüentemente, as menores taxa de infiltração, porém quando comparamos individualmente as seções Izídio e Canela I, estas apresentaram

valores de densidade de raízes e infiltração superior a seção Canelas II que é considerada uma área parcialmente conservada.

No intuito de avaliar se as três áreas classificadas neste trabalho como conservada, parcialmente conservada e degradada, apresentam características diferentes em relação a disposição da vegetação, foi aplicado um teste de média para densidade de raiz (DRaiz) e profundidade de infiltração (Zmáx), desta forma as três áreas avaliadas são diferentes, conforme tabela 7.

Tabela 7 - Teste de média para densidade de raiz (DRaiz) e profundidade de infiltração (Zmax).

	Draiz	Zmax
AC	4,1 A	10,4 A
APC	1,46 B	8,23 B
AD	0,28 C	5,53 C

Fonte: Dados da pesquisa, 2015.

Em seus estudos Smith (1976), encontrou que uma margem sedimentar vegetada com um volume de raiz correspondente a 16-18% e com 5 cm de profundidade ofereceu cerca de 20.000 vezes mais proteção a erosão, quando relacionadas à margens com ausência de cobertura vegetal. Já Beeson e Doyle (1995), constataram que margens vegetadas poderiam ser cerca de cinco vezes mais resistentes que as não vegetadas, considerando a descarga, declividade, ângulo de curvatura, textura e altura de margens constantes. Tal fato é explicado, pois em margens vegetadas tendem a apresentarem solos com melhor drenagem.

De acordo com Fernandez (1995), na maioria das vezes, as espécies vegetais com denso sistema radicular são mais benéficas que as espécies com poucas raízes no que diz respeito a redução da erodibilidade do solo. O mesmo autor relata que as margens com vegetação apresentam uma melhor drenagem em comparação com as margens desprovidas de vegetação, devido a duas razões principais: a ramagem das árvores evita que de 15 a 30% do volume da precipitação alcance a superfície do terreno; e as plantas retiram água do solo e a devolvem para atmosfera reduzindo o teor de umidade dos solos.

Outra razão pela qual as margens vegetadas apresentam melhores condições de drenagem é devido ao aumento da condutividade hidráulica que decorre da presença de raízes. Este aumento de permeabilidade contribui para que a vegetação atue na estabilidade das margens reduzindo os efeitos das pressões neutras que muitas vezes

geram movimentos de massa após um rápido rebaixamento do nível de água (FERNANDEZ, 1995).

Conforme exposto, as margens que apresentam uma concentração maior de raízes, ou seja, dispõe de vegetação, exibem-se drenagens melhores comparadas as margens desprovidas de vegetação, isto pode contribuir decisoriamente na estabilidade das margens aos processos de erosão, reforçando novamente, a necessidade de manter as a vegetação ciliar preservada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o período avaliado as precipitações observadas na área em estudo ficaram abaixo da média histórica que é de 691 mm ano⁻¹, sendo observado um volume de 428,77mm. Já as variações no nível e nas vazões do rio Jaguaribe, apresentaram algumas oscilações, sendo notado que as maiores vazões se concentraram nos meses de estiagem, enquanto na quadra chuvosa, o nível e as vazões do rio mostram-se inferiores.

Com os mapas de uso e cobertura vegetal do trecho em estudo para os anos de 1989 e 2014 foram identificadas as seguintes classes de uso: agricultura, pastagens, bancos de areia, recursos hídricos, área urbana e vegetação. Desta forma, nota-se mudanças nas áreas das classes de usos entre os anos de 1989 e 2014, como exemplo, a agricultura que obteve um crescimento de 8,55%, acompanhado das pastagens que aumentaram sua área em 12,79%. Já a vegetação durante os 25 anos avaliados sofreu uma redução significativa em torno de 19,22% na sua representação. As demais classes apresentam mudanças discretas nas suas áreas.

No que se refere as mudanças morfológicas do canal fluvial para os anos de 1989 e 2014, foi possível perceber que o trecho do rio avaliado ao longo deste período (25 anos) não apresentou grandes mudanças, porém em quatro pontos do rio, foram identificados processos mais evidentes de erosão de margem que contribuíram no seu alargamento. Nos quatros pontos identificados o recuo médio anual para o período de 25 anos foi de 1,36 m/ano, já o recuo médio anual obtido pelos pinos de erosão nas áreas avaliadas foi 0,53 cm/ano, o que indica que a erosão não é constante e pode variar de ano para ano, estando veiculada diretamente aos fatores climáticos e hidrológicos.

Os processos erosivos atuantes observados durante a pesquisa no trecho do rio Jaguaribe foram: processos erosivos pluviais, decorrentes da ação das gotas de chuvas e do escoamento superficial das águas; processo de corrosão decorrente do desgaste mecânico da margem, geralmente através das particular carregadas pelas água; desmoronamento por cisalhamento que ocorre quando bloco, devido ao solapamento da margem desmorona; e desmoronamento por basculamento que ocorre quando um bloco de terra perde equilíbrio e desmorona sem prévio solapamento acompanhado pela formação de fendas de tensão na superfície da margem.

O recuo das margens, assim como o volume erodido para o período avaliado foi considerado muito baixo. Isto pode estar relacionado diretamente as reduzidas vazões e as oscilações do nível do rio, assim como as baixas precipitações observadas que ficaram

abaixo da média histórica. As áreas degradadas apresentaram um recuo médio anual de 1,08 cm, já as áreas conservadas e parcialmente conservadas, apresentaram, respectivamente, recuo médio anual de 0,25 e 0,27 cm.

Como a taxa de perda de solo não é constante durante ano, verificou-se que ela é nula no início, ou seja, no período de estiagem (sem chuva) e vai crescendo com o aumento das precipitações, porém volta a diminuir no final do período avaliado, justamente, coincidindo com o início da estação seca, onde as precipitações vão sendo reduzidas.

Desta forma pode afirmar que para o período avaliado a principal variável atuante nos processos de erosão de margens no rio Jaguaribe foram as precipitações. Foi observado que as precipitações acumuladas acima de 100 mm, principalmente próximas dos 300 mm que se concentrou os principais picos de erosão. Porém as seções Rio Cruzes (área conservada) e Sinhã (área parcialmente conservada), começaram a perder solo bem no início das precipitações, diferente das áreas degradadas onde observou-se que os picos erosivos foram muito semelhantes, se concentrando nas precipitações acumuladas próximo aos 300 mm.

Nesta perspectiva, podemos relacionar que uma das causas para ocorrência da erosão das margens do rio Jaguaribe é a ocupação indiscriminada das Áreas de Proteção Permanente (APPs). A vegetação ciliar vem sendo suprimida pelas atividades humanas, principalmente, as voltadas para agricultura irrigada e pecuária (pastagens).

A vegetação desempenha um papel fundamental na estabilidade das margens isto foi reforçado pelos dados de densidade de raiz e infiltração obtidos nas áreas monitoradas. Nas áreas que apresentaram uma maior concentração de raízes (áreas conservadas) a infiltração foi maior e, conseqüentemente, as taxas de recuo bem inferiores, porém nas áreas que apresentaram uma menor concentração de raízes (área degradada) a infiltração foi menor e o volume erodido mais elevado.

De forma, conclusiva, o presente trabalho contribuiu para o entendimento da dinâmica dos processos erosivos no rio Jaguaribe, abrindo caminho para novos estudos sobre a temática. Os resultados mostram que os valores de erosão foram considerados baixos, porém é importante ressaltar que o período avaliado apresentou chuvas abaixo da média, assim como as vazões do rio, ou seja, os valores de erosão podem ser intensificados em anos que apresentem precipitações maiores.

É de fundamental importância um maior planejamento das margens do rio Jaguaribe, ou seja, fiscalizar o cumprimento do Código Florestal, pois é notório observar

atividades dentro da Área de Proteção Permanente (APP) do rio. Isto tem contribuído para remoção da vegetação ciliar, e pode acelerar os processos erosivos marginais trazendo mudanças no canal fluvial, intensificando o processo de assoreamento do rio, perda de solos agricultáveis, comprometimento de atividades econômicas entre outros.

REFERÊNCIAS

- AB' SABER, A. N. O suporte geoecológico das florestas beiradeiras (ciliares). In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. de F. **Matas Ciliares: Conservação e Recuperação**. 2.ed. São Paulo: EDUSP/FAPESP, 2004. Cap. 1, p.15 – 25.
- ANDRADE, J.H.R.; CAVALCANTE, A. A. Processos erosivos marginais no Baixo Jaguaribe: Estudo de caso no rio Jaguaribe – Ceará – Brasil. **Revista GEONORTE** (Edição Especial), v.10, n.1, p.429-432, 2014.
- ANDRADE, J.H.R.; COSTA, C.de A. Degradação da mata ciliar com carnaúba no baixo curso do rio Jaguaribe – Ceará. In: SEABRA, G. **Terra: qualidade de vida, mobilidade e segurança nas cidades**. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2013. p.339-351.
- ARAÚJO, J. C. de. Recursos hídricos em regiões semiáridas. In: GHEYI, H. R., *et al.* **Recursos hídricos em regiões semiáridas: Estudos e aplicações**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2012. 258p.
- ARAÚJO, G.H.de S.; ALMEIDA, J.R.de; GUERRA, A.J.T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. 3ªed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008.320p.
- BEESEON, C. E.; DOYLE, P. F. Comparison of bank erosion at vegetated and non vegetated channel bends. **American Water Resources Association**, 31(6), p. 983-990, 1995.
- BERTALANFFY, V. L. **Teoria geral dos Sistemas**. Petrópolis: Editora Vozes, 1975.
- 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.
- CAMARGO, L. H. R. de. **A ruptura do meio ambiente: conhecendo as mudanças ambientais do planeta através de uma nova percepção da ciência: a geografia da complexidade**. 2ªed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008. 240p.
- CARMO, M. H. C. do. **Mudanças na dinâmica do canal Santa Smélia em função da urbanização**: Belford Roxo - RJ/Verão 2001-2002. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2003.
- CASADO, A. P. B., HOLANDA, F. S. R., e YAGUIU, P. Evolução do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco (perímetro irrigado Cotinguiba /Pindoba - SE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26(1), p.231-239, 2002.
- CAVALCANTE, A. A. **Morfodinâmica fluvial em rios semiáridos: O rio Jaguaribe a jusante da barragem do Castanhão – CE – Brasil**. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

CAVALCANTE, A. A.; CUNHA, S.B. **Caracterização do Sistema Fluvial do Rio Jaguaribe no Semi-Árido Cearense**. In: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande-MS, 2009.

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, 2011. p.83-112.

CAVALCANTI, A.P.B. **Método e técnica da pesquisa ambiental**: guia para estudos do meio ambiente. Teresina: UFPI/CCHL/DGH, 2006.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Caderno regional da sub-bacia do Baixo Jaguaribe / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos**. Fortaleza : INESP, 2009. 104p.
CHARLTON, R. **Fundamentals of Fluvial Geomorphology**. Routledge: New York 2008. 234p.

CHISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec, 1979.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia fluvial. In: _____. **Geomorfologia**. 2.ed. São Paulo: Editora Blucher, 1980. p. 65 – 101.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981. 312p.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 93-148.

CUNHA, S. B. Canais fluviais e a gestão ambiental. In: GUERRA, Antonio José Teixeira; CUNHA, Sandra Batista da (Org.). **A questão ambiental: diferentes abordagens**. 5.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. Cap. 7, p. 219-237.

CUNHA, S. B. da. Geomorfologia fluvial. In: GUERRA, Antonio José Teixeira; CUNHA, Sandra Batista da (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de base e conceitos**. 8.ed. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 2008. Cap.5, p. 211 – 246.

CUNHA, S.B.da; GUERRA, A.J.T. Degradação Ambiental. In: GUERRA, J.T.; CUNHA, S.B.da. **Geomoforlogia e meio ambiente**. 10° ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. P. 337-380.

FERNANDEZ, O. V. Q. Determinação do nível e da descarga de margens plena em cursos fluviais. **Boletim de Geografia**, v.21, p.97-109, 2003.

FERNANDEZ, O. V. Q. Erosão marginal no lago da UHE Itaipu (PR). Rio Claro, SP: UNESP, 1995. 113 p.

FERNANDEZ, O. V. Q.; FULFARO, V. J. Magnitudes e processos da erosão marginal no rio Paraná, trecho de Porto Rico, PR. **Geografia**. Rio Claro, n. 18, p. 97 – 114, 1993.

FERNANDEZ, O.V.Q. **Mudanças no Canal Fluvial do rio Paraná e Processos Erosivos nas Margens**: região de Porto Rico-PR. Rio Claro:1990, 86p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geocências. UNESP, Rio Claro, 1990.

FISRWG – The Federal Interagency Stream Restoration Working Group. Stream corridor restoration: principles, processes and practices. **Federal agencies of the US gov't**, 1998.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand Brasil, 1997.

GUIDOLINI, J. F. **Modelagem da dinâmica do uso e ocupação do solo (1975 a 2010) na bacia do Rio Uberaba, município de Veríssimo – MG**. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Florianópolis, SC: p.1-4 ,2013.

HOOKE, J. Magnitude and distribution of rates of river bank erosion. **Earth Surface Processes**,5, p.143-157, 1980.

HOOKE, J.M. An Analysis of the Processes of River Bank Erosion. **Journal of Hidrology**. Nº 42, p.38-62, 1979.

HUGGETT, R.J. **Fundamentals of geomorphology**.Londres: Routledge, 2007.

KAGEYAMA, P. Y. *et.at*. **Restauração da mata ciliar**: manual para recuperação de áreas ciliares e microbacias. Rio de Janeiro:Semads, 2001.

KARMANN, I. Água: ciclo e ação geológica. In: TEIXEIRA, Wilson et. al. **Decifrando a Terra**. 2ed.São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. p.186-209.

Kondolf G. M; Curry R.R.. The role of riparian vegetation in channel bank stability: Carmel River, California. In California Riparian Systems, Warner RE, Hendrix KM (eds). **University of California Press**: Berkeley; p.124–133,1984.

KONDOLF, G. M., CURRY, R. R. Channel erosion along the Carmel River, Monterey County, California. **Earth Surface Processes and Landforms. Wiley InterScience**. v.11, n., 1986.

LEOPOLD, L.B.; WOLMAN, M.G. River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight. U.S. **Geological Survey Professional Paper**. 282-B,1957. 51p.

LIMA, W. de P.; ZAKIA, M. J. B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES, Ribeiro Ricardo; LEITÃO FILHO, Hermógenes de Freitas. **Matas Ciliares**: Conservação e Recuperação. 2.ed. São Paulo: EDUSP/FAPESP, 2004. Cap. 3. p.33 – 44.

MAGALHÃES, Hélder Emanuel Silva. **Avaliação do estado de potencial erosão de margens de um curso de água**: aplicação do a troços estuarinos de rios do norte de Portugal. Disertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2010.

MAIA, C. E. **Método simplificado para estimativa das dimensões do bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial**. In: II Inovagri International Meeting, II Brazilian Symposium on Salinity & II Brazilian Meeting on Irrigation Engineering. Fortaleza, BR: Inovagri, p. 1674-1682, 2014

MAIA, C.E.; MORAIS, E.R.C.; MIRANDA, N.O. & ARAÚJO JUNIOR, B.B. Crescimento do meloeiro Orange Flesh em função do preparo do solo e construção de camalhão. **Revista Ciência Agronômica**, v.40, p.41-47, 2009.

MATTOS, S. H. V. L.; PEREZ FILHO, A. Complexidade e estabilidade em sistemas geomorfológicos: uma introdução ao tema. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 5 n.1, p. 11-18, 2004.

NASCIMENTO, F, R.; CARVALHO, O. **Bacias Hidrográficas como unidades de planejamento e gestão ambiental**: uma proposta metodológica. Revista Fluminense de Geografia, Niterói-RJ, v.2, p.61-82, 2003.

NOVO, E.M.L. de M. Ambiente fluvial. FLORENZANO, T.G. (Org.). **Geomorfologia**: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Texto, 2008. p.219-247.

POPP, J. H. **Geologia Geral**. 6°.ed Rio de Janeiro: LTC, 2010.

PRESS, F. *et al*. Rios: o transporte para os oceanos. In: _____. **Para entender a Terra**. 4.ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. Cap. 14, p. 341- 246.

RICARDO, R. R.; GANDOLFI, S. Conceitos, tendências e ações para recuperação de florestas ciliares. In: RODRIGUES, Ribeiro Ricardo; LEITÃO FILHO, Hermógenes de Freitas. **Matas Ciliares**: Conservação e Recuperação. 2.ed. São Paulo: EDUSP/FAPESP, 2004. Cap. 15. p. 235 – 249

RICCOMINI, C. *et. al*. Processos erosivos e lacustres e seus registros. In: TEIXEIRA, Wilson *et. al*. **Decifrando a Terra**. 2ed.São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. p. 306 – 333.

ROCHA, P. C.; SOUZA FILHO, E. E. de. Erosão marginal e evolução hidrodinâmica no sistema rio-planície fluvial do Alto Paraná-Centro Sul do Brasil. In: NUNES, J.O.R.; ROCHA, P. C. (org.). **Geomorfologia**: aplicações e metodologias. São Paulo: Expressão Popular: UNESP. Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2008.

RODRIGUES, R. R. Uma discussão nomenclatural das formações ciliares. In: RODRIGUES, Ribeiro Ricardo; LEITÃO FILHO, Hermógenes de Freitas. **Matas Ciliares**: Conservação e Recuperação. 2.ed. São Paulo: : EDUSP/FAPESP, 2004. Cap. 6. p.91 – 99.

ROSGEN, D.L. **A practical Method of. Computing straeambank erosion rate**. 7th. Federal Interagency Sediment Conference, Março 24-29, Reno, Nevada.

ROSS, J. L.S. **Ecogeografia do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SCHUMM S.A. **River variability and complexity**. Cambridge University Press: Cambridge, 2005. 220p.

SEABRA, V. da. S. et al. Mapeamento do uso e cobertura do solo da bacia do rio Taperoá: Região semiárida do Estado da Paraíba. **Caminhos da Geografia**, v.15, n.50, p.127-137, 2014.

SMITH, D.G. Effect of vegetation on lateral migration of anastomosed channels of glacier meltwater river. **Geol. Soc. Am. Bull**, 87, p.857-860, 1976.

SOUZA, Cilia Alves de. **Dinâmica das margens do rio Paraguai entre a cidade de Cárceres e a Estação Ecológica da Ilha de Taiaí - MT**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro, 2004.

SOUZA, M.J.N. Bases naturais e esboço do Zoneamento Geoambiental do Estado do Ceará. In: LIMA, L.C.; MORAES, J.O.; SOUZA, M.J.N (Org.) **Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará**. Fortaleza: FUNECE, 2000, p.5-104.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J.J. **Ambientes Fluviais**. 2ªed. Florianópolis: Editora da UFSC: Editora da Universidade Federal do Paraná, 1990, 183p.

THORNE, C. R., TOVEY, N.K. Stability of composite river banks. *Earth Surface Processes and Landforms* . **Wiley InterScience**. v. 6, n. 5, p. 469-484, 1981.

WOLMAN, M.G.; LEOPOLD, L.B. River Flood Plains: some observations of their formation. U.S. **Geological Survey Professional Paper**. 282-C, p.87-107, 1957.

ZAVOIANU, I., 1985. "Morphometry of Drainage Basins." **Developments in Water Science**, v. 20. Elsevier, Amsterdam, 238 p.