



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

TESE DE DOUTORADO Nº 119

**ANÁLISE DA DINÂMICA DAS ÁREAS DE
MANGUEZAL NO LITORAL NORTE DO BRASIL A
PARTIR DE DADOS MULTISENSORES E
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS**

Tese apresentada por:

WILSON DA ROCHA NASCIMENTO JÚNIOR
Orientador: Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA)

**BELÉM
2016**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Nascimento Júnior, Wilson da Rocha, 1981-

Análise da dinâmica das áreas de manguezal no litoral norte do Brasil a partir de dados multissensores e hidrossedimentológicos / Wilson da Rocha Nascimento Júnior. – 2016

xxi, 132 f.: il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Pedro Walfir Martins e Souza Filho

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2016.

1. Sensoriamento remoto - Brasil, Norte. 2. Ecologia dos manguezais - Brasil, Norte. 3. Sedimentação e depósitos. 4. Desmatamento. 5. Solo - Uso - Brasil, Norte. I. Título.

CDD 22. ed. 621.367809811



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**ANÁLISE DA DINÂMICA DAS ÁREAS DE MANGUEZAL
NO LITORAL NORTE DO BRASIL A PARTIR DE DADOS
MULTISENORES E HIDROSEDIMENTOLÓGICOS**

TESE APRESENTADA POR

WILSON DA ROCHA NASCIMENTO JÚNIOR

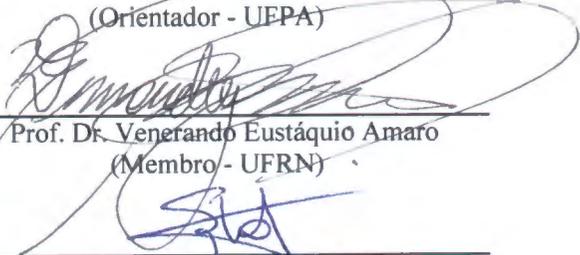
**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de
GEOLOGIA.**

Data de Aprovação: 16 / 12 / 2016

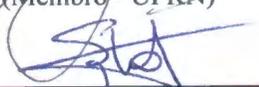
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho
(Orientador - UFPA)



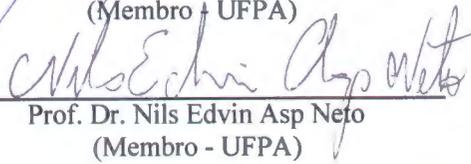
Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro
(Membro - UFRN)



Prof. Dr. Claudio Fabian Szlafsztajn
(Membro - UFPA)



Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva
(Membro - UFPA)



Prof. Dr. Nils Edvin Asp Neto
(Membro - UFPA)

*Aos meus pais, Wilson e Benildes,
e minha irmã, Thuizy,
pelo amor absoluto.
Dedico a vocês por todo apoio em minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Wilson Nascimento e Benildes Lopes, minha irmã e cunhado, Thuizy Nascimento Andrade e Marcelo Andrade, por todo o apoio e amor ao longo de minha vida. Só tenho a agradecer a Deus por vocês serem minha família.

Agradeço também aos meus tios, tias, primos e primas por estarem sempre ao meu lado fortalecendo os laços familiares, pois família é a base de qualquer ser humano.

Aos amigos Victor Jonhnathan Oliveira, Walber Torres, Alexandre Oliveira, Diogo Santos (Diodio Comando), Rafael Reis e Olavo Bilac pelas palavras de incentivo ao longo de minha carreira acadêmica além da eterna amizade. Posso dizer que a amizade de vocês é muito importante para mim e me ajudou em vários momentos ao longo do desenvolvimento do trabalho.

A Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) por permitirem meu ingresso e possibilidade de desenvolver a pesquisa acadêmica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas ao longo de minha trajetória acadêmica no mestrado e atualmente doutorado.

Ao amigo e orientador Pedro Walfir Martins e Souza Filho por me ensinar valores que atualmente são indispensáveis em minha vida profissional e pessoal. Por acreditar no meu caráter e apoiar minha trajetória acadêmica ao longo do mestrado e doutorado.

Aos professores Roberto Vizeu, Paulo Gorayeb e José Augusto por avaliarem a proposta de doutorado e permitirem meu ingresso no PPGG.

A Cleida Freitas, secretária do PPGG, pelas cobranças, ajudas em momentos de preocupação e incentivo para a conclusão do trabalho.

Aos professores Arnaldo Queiroz, Claudio Szlafeinzein, Thiago Sana e Nils Asp Neto por toda contribuição para o desenvolvimento da tese. A preocupação de vocês para o enriquecimento do trabalho foi muito importante para ajustar a proposta de doutorado e realização da mesma.

A família do LAIT (Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido): Paulo José Alves, Lourival Gomes, Glenda Carvalho, Karla Nascimento, Michele Cougo, Edson Adjair

Pereira, Marcio Sousa, Francisco Costa, João e Carlos. Obrigado pela amizade e pelos ensinamentos diretos e indiretos adquiridos em nossa convivência nesse maravilhoso ambiente de trabalho do LAIT.

Ao amigo Afonso Quaresma pelos momentos de diversão e muito trabalho nos campos de minha pesquisa e outros. A convivência com você no campo foi muito valiosa para meu aprimoramento nas pesquisas em geociências.

Ao amigo e irmão Francisco Oliveira pelo apoio incansável para finalização desta pesquisa. Agradeço você irmão pela força e amizade.

Gostaria de agradecer a todos que podem não ter sido citados aqui, mas contribuíram de forma direta e indireta para o resultado desta pesquisa.

*“O que é o sucesso?
Rir muito e com frequência;
ganhar o respeito de pessoas
inteligentes e o afeto das crianças;
merecer a consideração de críticos honestos
e suportar a traição de falsos amigos;
apreciar a beleza, encontrar o melhor nos outros;
deixar o mundo um pouco melhor, seja por uma saudável
criança, um canteiro de jardim ou uma redimida condição social;
saber que ao menos uma vida respirou mais fácil porque você viveu.
Isso é ter tido sucesso!”*

Bessie Anderson Stanley.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é analisar a dinâmica das áreas de manguezal no litoral norte do Brasil a partir de imagens de sensores remotos orbitais e dados hidrossedimentológicos (vazão e concentração de sedimentos em suspensão). Buscamos compreender a existência de causalidade entre a expansão ou retração dos manguezais com a descarga sólida em suspensão calculada a partir de dados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão. Os manguezais foram mapeados, utilizando a técnica de classificação orientada ao objeto, nos anos de 1975, 1996 e 2008 tendo como base dados de sensores imageadores na faixa das microondas (RADAM/GEMS; JERS-1; ALOS/PALSAR). Foram utilizados os dados de estações fluviométricas e sedimentos da Agência Nacional de Águas para calcular a descarga sólida em suspensão nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim buscando relacionar a acresção e erosão nas áreas de manguezal com a carga sedimentar dos rios que deságuam no litoral. As variações de vazão refletem a precipitação nas sub-bacias dos rios analisados e apresentaram correlação forte e moderada com as anomalias de temperatura na superfície do oceano Pacífico evidenciando uma relação dos fenômenos El Niño e La Niña com os regimes de precipitação na Amazônia. As variações de concentração de sedimentos em suspensão não apresentaram relação com a variação fluviométrica sugerindo que as oscilações médias anuais são reflexos de outros fenômenos (cobertura e uso do solo). Os resultados mostram que as áreas drenadas das sub-bacias mais impactadas pela ação antrópica contribuem com uma carga sedimentar superior a rios que possuem maior concentração de floresta nativa. A vegetação nativa contribui para a contenção da erosão do solo e as áreas de solo exposto e pastagem são mais vulneráveis a erosão dos solos. Os rios Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim apresentaram carga sólida em suspensão superior ou igual ao rio Araguari. Analisando os manguezais nos estuários percebemos a acresção dos manguezais nas margens nos estuários dos rios Gurupi e Mearim (Baía de São Marcos) e a diminuição das áreas de manguezal no estuário do rio Araguari. A zona costeira amazônica está sujeita a processos naturais de grande magnitude, porém as atividades antrópicas influenciam na dinâmica natural da região ao implementar práticas econômicas ambientalmente insustentáveis.

Palavras-Chave: Sensoriamento Remoto; Manguezais; Desmatamento; Cobertura e Uso do solo.

ABSTRACT

The objective of this research is to analyze the dynamics of the mangrove areas in the north coast of Brazil from images of remote orbital sensors and hydrosedimentological data (flow and suspended sediment concentration). We tried to understand the existence of causality between the expansion or retraction of the mangroves with the suspended solid discharge calculated from the data of flow and suspended sediment concentration. The mangroves were mapped, using the object oriented classification technique, in the years 1975, 1996 and 2008 based on data from microwave sensors (RADAM / GEMS, JERS-1, ALOS / PALSAR). The data of fluviometric stations and sediments of the National Water Agency were used to calculate the solid discharge in suspension in the rivers Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú and Mearim seeking to relate the addition and erosion in the areas of mangrove with the sedimentary load of the rivers that drain On the coast. The flow variations reflect the precipitation in the sub-basins of the analyzed rivers and presented a strong and moderate correlation with the temperature anomalies on the surface of the Pacific Ocean evidencing a relation of the El Niño and La Niña phenomena with the precipitation regimes in the Amazon. The variations of suspended sediment concentration were not related to the fluviometric variation suggesting that the annual mean oscillations are reflections of other phenomena (coverage and land use). The results show that the drainage areas of the sub-basins most impacted by the anthropic action contribute with a higher sediment load to rivers that have a higher concentration of native forest. Native vegetation contributes to containment of soil erosion and exposed soil and pasture areas are more vulnerable to soil erosion. The Gurupi, Pindaré, Grajaú and Mearim Rivers presented solid suspended load higher than or equal to the Araguari River. Analyzing the mangroves in the estuaries we noticed the addition of mangroves along the estuaries of the Gurupi and Mearim rivers (Baia de São Marcos) and the reduction of mangrove areas in the Araguari estuary. The Amazon coastal zone is subject to natural processes of great magnitude, but atrophic activities influence the natural dynamics of the region by implementing unsustainable economic practices.

Keywords: Remote Sensing; Mangroves; Deforestation; Coverage and Land Use.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 2:

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Localização da área de estudo..... | 5 |
| Figura 2.2: Precipitação total acumulada (2015) e anomalias de precipitação com base na normal climatológica de 1981 a 2010 (Fonte: INMET, 2016)..... | 6 |
| Figura 2.3: Temperatura média observada em 2015 e anomalias de temperatura com base na normal climatológica de 1981 a 2010 (Fonte: INMET, 2016)..... | 7 |
| Figura 2.4: Divisão das regiões hidrográficas Amazônica e Atlântico Nordeste Ocidental de acordo com o CNRH, resolução nº 32..... | 8 |
| Figura 2.5: Áreas desmatadas em 2015 na zona costeira amazônica de acordo com os dados PRODES..... | 10 |
| Figura 2.6: População nas sub-bacias de acordo com os dados do censo realizado nos anos de 2000 e 2010 (Fonte: IBGE, 2016)..... | 11 |
| Figura 2.7: População urbana e rural nas sub-bacias de acordo com os dados do censo de 2010 (Fonte: IBGE, 2016)..... | 12 |

CAPÍTULO 3:

| | |
|---|----|
| Figura 3.1: Fluxograma destacando os passos realizados no capítulo 3..... | 17 |
| Figura 3.2: Detecção de mudanças nos manguezais da zona costeira amazônica entre as décadas de 1970 e 1990. Os retângulos destacam detalhes das mudanças na Ilha de Maracá (AP), Ilhas de Mexiana e Caviana (PA) e no município de Bragança (PA)..... | 28 |
| Figura 3.3: Detecção de mudanças nos manguezais da zona costeira amazônica entre as décadas de 1990 e 2000. Os retângulos destacam detalhes das mudanças na Ilha de Maracá (AP), Ilhas de Mexiana e Caviana (PA) e no município de Bragança (PA)..... | 29 |
| Figura 3.4: Mudanças ocorridas entre as décadas de 1970 e 1990 destacando três áreas da zona costeira amazônica (Foz do Araguari - Amapá, litoral Nordeste do Pará e Baía de São Marcos - Maranhão)..... | 34 |
| Figura 3.5: Mudanças ocorridas entre as décadas de 1990 e 2000 destacando três áreas da zona costeira amazônica (Foz do Araguari - Amapá, litoral Nordeste do Pará e Baía de São Marcos - Maranhão)..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.6: Desmatamento em áreas de manguezais por ação atópica localizado no município de Tracuateua- PA. A área desmatada representa a abertura de rodovias não pavimentadas sobre floresta de mangue..... | 37 |
| Figura 3.7: Detecção de mudanças entre as décadas de 1990 e 2000. Dinâmica nas margens das ilhas de Mexiana, Caviana e Janaucu localizadas na foz do rio Amazonas..... | 38 |

CAPÍTULO 4:

| | |
|--|----|
| Figura 4.1: Fluxograma representando as etapas realizadas no capítulo 4..... | 44 |
| Figura 4.2: Figura identificando a circulação das correntes marinhas no planeta a 5 metros de profundidade da superfície do mar (Fonte: NCAR/UCAR (2016))..... | 48 |
| Figura 4.3: Identificação das áreas nos estuários dos rios Araguari, Gurupi e Mearim onde foram quantificadas as áreas de mangue para análise relacional com os dados de descarga sólida em suspensão..... | 49 |
| Figura 4.4: Variações dos dados anuais médios de vazão nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim..... | 51 |
| Figura 4.5: Variações dos dados anuais médios de concentração de sedimentos em suspensão nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim..... | 53 |
| Figura 4.6: Comparação do comportamento da concentração de sedimentos em suspensão (C _{ss}) dos rios no período de 1995 a 2008..... | 54 |
| Figura 4.7: Variações dos dados anuais médios de descarga sólida em suspensão nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim..... | 56 |
| Figura 4.8: Descarga sólida em suspensão direcionada para os estuários dos rios Araguari (AP), Gurupi (PA/MA) e Mearim (MA)..... | 56 |
| Figura 4.9: Relação Vazão x C _{ss} no rio Araguari. O gráfico mostra linhas de tendências opostas entre vazão e sedimentos em suspensão..... | 57 |
| Figura 4.10: Comparação da descarga sólida em suspensão (Q _{ss}) nos rios entre 1995 e 2008. | 58 |
| Figura 4.11: Descarga sólida em suspensão nos rios Araguari, Gurupi e Mearim entre os anos de 1995 a 2008..... | 59 |
| Figura 4.12: Representação gráfica da quantificação de áreas de manguezal nos estuários dos rios Araguari, Gurupi e Mearim por década..... | 60 |
| Figura 4.13: Detecção de mudanças na foz e adjacências dos rios Araguari, Gurupi e Mearim entre as décadas de 1990 e 2000..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.14: Relação entre a descarga sólida em suspensão e a área de manguezal na foz do rio Araguari..... | 63 |
| Figura 4.15: Relação entre a descarga sólida em suspensão e a área de manguezal na foz do rio Gurupi/Piria..... | 64 |
| Figura 4.16: Relação entre a descarga sólida em suspensão e a área de manguezal na foz do rio Mearim..... | 65 |
| Figura 4.17: Distribuição vertical no transporte de sedimentos nos rios (Fonte: Carvalho, 2008)..... | 66 |
| Figura 4.18: Representação das áreas costeiras em acreção e erosão da foz do Amazonas ao Cabo Orange, Amapá / Fonte: elaborado por Gensac et al. (2016) com base em Nitrouer et al. (1991)..... | 68 |

CAPÍTULO 5:

| | |
|---|----|
| Figura 5.1: Fluxograma resumindo as etapas realizadas no capítulo 5..... | 72 |
| Figura 5.2: Área dos índices de temperatura da superfície do mar para El Niño (Fonte: Trenberth & NCARS, 2016)..... | 74 |
| Figura 5.3: Área dos índices de temperatura da superfície do mar para o oceano Atlântico Norte, Equatorial, Sul e mar do Caribe (Fonte: ESRL/NOAA, 2016)..... | 75 |
| Figura 5.4: Variações da anomalia da TSM nas áreas dos índices Niño 1+2 e North Tropical Atlantic de 1977 a 2008..... | 76 |
| Figura 5.5: Comparação das vazões anuais médias dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim com as anomalias de TSM no Pacífico Equatorial Sul..... | 77 |
| Figura 5.6: Comparação das vazões anuais médias dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim com as anomalias de TSM no Atlântico Norte..... | 78 |
| Figura 5.7: Representação da tendência das vazões nos rios Araguari, Gurupi e Pindaré de 1977 a 2008..... | 80 |
| Figura 5.8: Representação da tendência das vazões nos rios Grajaú e Mearim de 1977 a 2008. | 81 |

CAPÍTULO 6:

| | |
|---|----|
| Figura 6.1: Fluxograma sintetizando os passos realizados no capítulo 6..... | 85 |
| Figura 6.2: Média anual da concentração de sedimentos em suspensão (Css) nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim..... | 90 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.3: Classificação da cobertura e uso do solo na sub-bacia do rio Araguari..... | 92 |
| Figura 6.4: Classificação da cobertura e uso do solo na sub-bacia do rio Gurupi..... | 93 |
| Figura 6.5: Classificação da cobertura e uso do solo na sub-bacia do rio Pindaré..... | 94 |
| Figura 6.6: Classificação da cobertura e uso do solo na sub-bacia do rio Grajaú..... | 95 |
| Figura 6.7: Classificação da cobertura e uso do solo na sub-bacia do rio Mearim..... | 96 |
| Figura 6.8: Uso do solo nas regiões até 500 metros ao entorno das drenagens na sub-bacia do rio Araguari..... | 99 |
| Figura 6.9: Uso do solo nas regiões até 500 metros ao entorno das drenagens na sub-bacia do rio Gurupi..... | 100 |
| Figura 6.10: Uso do solo nas regiões até 500 metros ao entorno das drenagens na sub-bacia do rio Pindaré..... | 101 |
| Figura 6.11: Uso do solo nas regiões até 500 metros ao entorno das drenagens na sub-bacia do rio Mearim..... | 102 |
| Figura 6.12: Uso do solo nas regiões até 500 metros ao entorno das drenagens na sub-bacia do rio Grajaú..... | 103 |
| Figura 6.13: Comparação entre a dinâmica do desmatamento em áreas até 500 metros adjacentes aos rios e as variações na concentração de sedimentos em suspensão no rio Gurupi. | 105 |
| Figura 6.14: Comparação entre a dinâmica do desmatamento em áreas até 500 metros adjacentes aos rios e as variações na concentração de sedimentos em suspensão no rio Pindaré..... | 106 |
| Figura 6.15: Comparação entre a dinâmica do desmatamento em áreas até 500 metros adjacentes aos rios e as variações na concentração de sedimentos em suspensão no rio Mearim..... | 107 |
| Figura 6.16: Análise da variação de concentração de sedimentos em suspensão com a produção mineral da ICOMI..... | 109 |

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2:

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1: Área e percentual dos tipos de solo nas sub-bacias hidrográficas..... | 12 |
|---|----|

CAPÍTULO 3:

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1: Características dos sensores remotos utilizados..... | 18 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Tabela 3.2: Data das imagens óticas LANDSAT MSS (década de 1970) e TM (décadas de 1990 e 2000) utilizadas na classificação das áreas de manguezais na zona costeira amazônica. | 19 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Tabela 3.3: Parâmetros utilizados na segmentação multiresolução para a classificação dos manguezais nas décadas de 1970, 1990 e 2000 - Adaptado de Nascimento Jr et al. (2013).... | 21 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Tabela 3.4: A tabela apresenta as equações aritméticas elaboradas por Nascimento et al. (2013) para auxiliar a classificação dos manguezais nas décadas de 1970, 1990 e 2000. Os limiares obtidos são valores médios dos segmentos resultantes da operação aritmética realizada nas equações..... | 21 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Tabela 3.5: Árvore de Decisão ou sequência de processamento para a classificação dos manguezais utilizada por Nascimento Jr. et al. (2013). O modelo refere-se a classificação dos manguezais na década de 2000, porém a sequência de classificação permanece a mesma para as décadas de 1990 e 1970 substituindo apenas as equações..... | 23 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Tabela 3.6: Classes identificadas e utilizadas na árvore de decisão para a classificação dos manguezais. Os retângulos amarelo indicam a área aproximada aonde foram obtidas o registro fotográfico (Tabela adaptada de Nascimento et al., 2013)..... | 24 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Tabela 3.7: Árvore de Decisão ou sequência de processamento para a classificação das mudanças nas áreas de manguezais entre as décadas de 1970/1990 e 1990/2000 utilizada por Nascimento Jr. et al. (2013). A sequência abaixo demonstra o exemplo da detecção de mudanças entre as décadas de 1990 e 2000..... | 25 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Tabela 3.8: Quantificação das áreas de manguezais na Costa Norte e nas regiões hidrográficas Amazônia e Atlântico Nordeste Ocidental..... | 26 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Tabela 3.9: Quantificação das mudanças nas áreas de manguezais entre as décadas de 1970/1990 e 1990/2000 na Costa Norte e nas regiões hidrográficas Amazônia e Atlântico Nordeste Ocidental..... | 30 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Tabela 3.10: Matriz de confusão produzida para validação da classificação dos manguezais na década de 2000..... | 31 |
| Tabela 3.11: Matriz de confusão produzida para validação da classificação dos manguezais na década de 1990..... | 31 |
| Tabela 3.12: Matriz de confusão produzida para validação da classificação dos manguezais na década de 1970..... | 31 |

CAPÍTULO 4:

| | |
|--|----|
| Tabela 4.1: Sub-bacias delimitadas a partir de extração automática de drenagem no software Global Mapper. Abaixo segue a área de cada sub-bacia e os Estados as quais estão localizadas. | 45 |
| Tabela 4.2: Estações de coleta de dados da Agência Nacional de Águas identificando o nome, a natureza, ano de operação e localização da estação..... | 46 |
| Tabela 4.3: Dados anuais médios de vazão obtidos a partir de dados diários nas estações fluviométricas de Porto Platon (AP), Alto Bonito (PA), Pindaré-Mirim (MA), Aratoi Grande (MA) e Pedreiras II (MA)..... | 50 |
| Tabela 4.4: Correlação entre as vazões médias dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim..... | 51 |
| Tabela 4.5: Dados anuais médios de concentração de sedimentos em suspensão (Css) obtidos a partir de dados diários nas estações fluviométricas de Porto Platon (AP), Alto Bonito (PA), Pindaré-Mirim (MA), Aratoi Grande (MA) e Pedreiras II (MA)..... | 52 |
| Tabela 4.6: Dados anuais médios de carga sólida em suspensão (Qss) obtidos a partir de dados diários nas estações fluviométricas de Porto Platon (AP), Alto Bonito (PA), Pindaré-Mirim (MA), Aratoi Grande (MA) e Pedreiras II (MA)..... | 55 |
| Tabela 4.7: Área de manguezais em km ² nas décadas de 1970, 1990 e 2000 nos estuários e adjacências dos rios Araguari, Gurupi e Mearim..... | 59 |

CAPÍTULO 5:

| | |
|--|----|
| Tabela 5.1: Anomalias de temperatura da superfície do mar nas áreas dos índices Niño 1+2 e North Tropical Atlantic..... | 75 |
| Tabela 5.2: Correlação entre as vazões nos rios e as anomalias de TSM no Pacífico Equatorial Sul e Atlântico Norte durante 31 anos (1977 - 2008) e a cada 15 anos (1977 - 1992 e 1993 - 2008)..... | 79 |

CAPÍTULO 6:

| | |
|---|-----|
| Tabela 6.1: Série temporal de dados anuais médios da concentração de sedimentos em suspensão obtidos nas estações de sedimentos da Agência Nacional de Águas..... | 86 |
| Tabela 6.2: Imagens LANDSAT utilizadas para a classificação da cobertura do solo nas sub-bacias dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim..... | 87 |
| Tabela 6.3: Árvore de classificação utilizada para identificar as classes Solo Exposto, Floresta Nativa, Pastagem e Água..... | 89 |
| Tabela 6.4: Dados anuais de desmatamento do PRODES entre os anos de 1997 a 2008 nas sub-bacias hidrográficas dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim..... | 91 |
| Tabela 6.5: Acurácia Global e Índice Kappa referentes a classificação das sub-bacias nas décadas de 1980, 1990 e 2000..... | 97 |
| Tabela 6.6: Classificação da cobertura e uso do solo nas sub-bacias dos rios analisados em uma área de até 500 metros da rede de drenagem..... | 98 |
| Tabela 6.7: Relação entre a largura de um rio e a área de proteção estabelecida no Código Florestal Art. n° 2 (Consultado em Ministério do Meio Ambiente, 2011)..... | 103 |
| Tabela 6.8: Produção de arroz em toneladas por ano nos municípios da baixada maranhense na sub-bacia do rio Grajaú e sua correlação linear com a concentração de sedimentos em suspensão do rio Grajaú..... | 111 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ALOS** - Advanced Land Observing Satellite.
- ANA** – Agência Nacional de Águas.
- APP** – Área de Proteção Permanente.
- ATCOR** - Atmospheric Correction.
- CCM** – Complexos Convectivos de Mesoescala.
- CCNB** – Corrente Costeira Norte Brasileira.
- CNRH** – Conselho Nacional de Recursos Hídricos.
- CPRM** – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
- CPTEC** - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.
- DGI** – Divisão de Geração de Imagens.
- EMBRAPA** - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
- EN** – El Niño.
- ENOS** – El Niño Oscilação Sul.
- EPAGRI** - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina.
- ESRL** - Earth System Research Laboratory.
- GEMS** - Goodyear Mapping System 1000.
- GEOBIA** - Geographic Object Based Image Analysis.
- GLCF** – Global Land Cover Facility.
- ICOMI** - Indústria e Comércio de Minérios S.A.
- INMET** – Instituto Nacional de Meteorologia.
- INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- IPCC** - Intergovernmental Panel on Climate Change
- JAXA** - Japan Aerospace Exploration Agency.
- JERS 1** - Japanese Earth Resource Satellite 1.
- LANDSAT** - Land Remote Sensing Satellite.
- LI** – Linha de Instabilidade.
- LN** – La Niña.
- MDE** – Modelo Digital de Elevação.
- MMA** – Ministério do Meio Ambiente.
- NOAA** - National Oceanic and Atmospheric Administration.

MSS - Multispectral Scanner System.

NCAR - National Center for Atmospheric Research

NTA - North Tropical Atlantic.

OBT – Observação da Terra.

OLI – Operational Land Imager.

PALSAR - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar.

PRODES - Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite.

RADAM - Radar da Amazônia.

RADARSAT - Synthetic Aperture Radar Satellite.

RAISG - Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada.

REBIO – Reserva Biológica.

SAR - Synthetic Aperture Radar.

SEMADS - Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio de Janeiro.

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission.

SST - Sea Surface Temperature.

STA – South Tropical Atlantic.

TM - Thematic Mapper.

TSM – Temperatura da Superfície do Mar.

UC – Unidade de Conservação.

USGS - United States Geological Survey.

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul.

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------------|
| DEDICATÓRIA | iv |
| AGRADECIMENTOS..... | v |
| EPÍGRAFE..... | vii |
| RESUMO..... | viii |
| ABSTRACT..... | ix |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES..... | x |
| LISTA DE TABELAS..... | xiv |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS..... | xvii |
| | |
| CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO E ORGANIZAÇÃO DA TESE..... | 1 |
| | |
| CAPÍTULO 2: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 5 |
| | |
| CAPÍTULO 3: MAPEAMENTO DAS MUDANÇAS OCORRIDAS NOS MANGUEZAIS DA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA ENTRE 1975 E 2008 A PARTIR DE DADOS MULTISENORES..... | 14 |
| 3.1- INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 3.2- MATERIAIS E MÉTODOS..... | 17 |
| 3.3- RESULTADOS..... | 26 |
| 3.4- DISCUSSÃO..... | 33 |
| 3.4.1- A dinâmica dos manguezais na zona costeira amazônica..... | 33 |
| 3.4.2- A dinâmica dos manguezais no mundo..... | 39 |
| 3.5- CONCLUSÕES..... | 40 |

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 4: O PAPEL DAS VARIAÇÕES DE DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO DE RIOS AMAZÔNICOS NA DINÂMICA NAS ÁREAS DE MANGUEZAIS NA ZONA COSTEIRA ADJACENTE..... | 41 |
| 4.1- INTRODUÇÃO..... | 41 |
| 4.2- MATERIAIS E MÉTODOS..... | 44 |
| 4.2.1- Delimitação das sub-bacias hidrográficas..... | 45 |
| 4.2.2- Dados de estações fluviométricas e de sedimentos..... | 45 |
| 4.2.3- Estimativa da descarga sólida de sedimentos em suspensão utilizando a equação de Colby (1957)..... | 46 |
| 4.2.4- Quantificação das áreas de manguezais nos estuários dos rios Araguari, Gurupi e Mearim..... | 47 |
| 4.3- RESULTADOS..... | 49 |
| 4.3.1- Médias anuais de vazão..... | 49 |
| 4.3.2- Médias Anuais de Concentração de Sedimentos em Suspensão (Css)..... | 52 |
| 4.3.3- Médias anuais de descarga sólida em suspensão (Qss)..... | 54 |
| 4.3.4- Evolução das áreas de manguezais nos estuários dos rios Araguari, Gurupi e Mearim..... | 59 |
| 4.4- DISCUSSÃO..... | 65 |
| 4.5- CONCLUSÕES..... | 69 |
| | |
| CAPÍTULO 5: ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE AS ANOMALIAS DE TEMPERATURA DOS OCEANOS PACÍFICO EQUATORIAL E ATLÂNTICO NORTE COM A VAZÃO DOS RIOS ARAGUARI, GURUPI, PINDARÉ, GRAJAÚ E MEARIM..... | 71 |
| 5.1- INTRODUÇÃO..... | 71 |
| 5.2- MATERIAIS E MÉTODOS..... | 72 |
| 5.3- RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 75 |
| 5.4- CONCLUSÕES..... | 81 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 6: MUDANÇA NA COBERTURA E USO DA TERRA NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DE RIOS AMAZÔNICOS E SUA RELAÇÃO COM A CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO..... | 83 |
| 6.1- INTRODUÇÃO..... | 83 |
| 6.2- MATERIAIS E MÉTODOS..... | 85 |
| 6.2.1- Dados anuais de concentração de sedimentos em suspensão..... | 86 |
| 6.2.2- Extração automática da rede de drenagem e delimitação da região de interesse (buffer de 500 metros)..... | 86 |
| 6.2.3- Dados de desmatamento PRODES..... | 86 |
| 6.2.4- Classificação da cobertura do solo..... | 87 |
| 6.3- RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 89 |
| 6.3.1- Apresentação dos dados de C _{ss} , desmatamento (PRODES) nas adjacências das drenagens e mapeamento de cobertura e uso do solo nas sub-bacias hidrográficas..... | 90 |
| 6.3.2- Análise de correlação entre as variações de C _{ss} e o desmatamento do PRODES nas margens dos rios nas sub-bacias analisadas..... | 104 |
| 6.3.3- Análise de correlação entre as variações de C _{ss} e a produção mineral da ICOMI na sub-bacias do rio Araguari..... | 108 |
| 6.3.4- Análise de correlação entre as variações de C _{ss} e a orizicultura na sub-bacia do rio Grajaú..... | 110 |
| 6.3.5- Ocupação na zona costeira amazônica, desmatamento e áreas de proteção..... | 111 |
| 6.4- CONCLUSÃO..... | 114 |
| | |
| 7- CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 116 |
| | |
| REFERÊNCIAS..... | 118 |

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO E ORGANIZAÇÃO DA TESE.

Os manguezais são ecossistemas costeiros que ocupam faixas litorâneas tropicais e sub-tropicais do planeta. Geralmente estão situados em áreas que são inundadas periodicamente pelas marés (estuários, lagoas costeiras, baías e deltas) (Herz, 1991). A distribuição desse ecossistema vai depender de variáveis como nível de proteção das áreas costeiras, adaptação à salinidade do solo e da água e adaptação as variações de temperatura do ar e da água (Kjerfve, 1990).

Dentre as funções que o manguezal desempenha podemos citar a proteção da linha de costa contra ação erosiva das ondas e marés (Giri et al., 2011), a retenção de sedimentos carregados pelos rios (Eisma, 1986), são áreas de reprodução de várias espécies de aves, mamíferos e peixes (Barbier et al., 2011). Porém uma função de extrema importância é a de concentrar nutrientes nas zonas estuarinas permitindo a renovação da biomassa costeira (SEMADS, 2001; Dittmar et al., 2006).

Na costa brasileira os manguezais ocorrem desde a foz do rio Oiapoque, no Amapá, até o município de Laguna, em Santa Catarina (Hers, 1991; Schaeffer-Novelli et al., 2000). Na região Norte do Brasil os manguezais dominam da foz do rio Oiapoque até o Golfão Maranhense e representam aproximadamente 70% dos manguezais brasileiros (Souza Filho, 2005; Meneses et al., 2008).

Os manguezais sofreram ao longo da história um processo de degradação ambiental muito intenso resultante de vetores antrópicos. De acordo com Polidoro et al. (2010) vários estudos realizados para avaliar o risco de extinção para algumas espécies de mangue indicam que 70 espécies de animais correm risco de extinção e poderiam desaparecer nas próximas décadas.

As mudanças climáticas estão recebendo atenção devido aos seus potenciais impactos na zona costeira resultando no aumento no nível do mar e na temperatura do mar e do ar em função do aumento de CO₂ na atmosfera (Alongi, 2008). Conforme o IPCC (2013), as últimas estimativas de elevação do nível do mar sugerem um aumento em 95% das zonas costeiras mundiais variando entre 0,26 m e 0,98 m.

A ação antrópica direta pode influenciar no balanço de sedimento resultando no aumento ou diminuição do nível do substrato. Essas intervenções irão ser importantes na resposta dos manguezais às mudanças climáticas, pois podem resultar no aumento de salinidade das águas e alterar a hidrodinâmica nas bacias hidrográficas e conseqüentemente na

quantidade de sedimento que chega nas regiões costeiras. Isso pode afetar o equilíbrio entre sedimentação e erosão na linha de costa (Godoy e Lacerda, 2014; Scavia et al., 2002; Lacerda et al., 2013).

Um elemento muito importante para a sobrevivência dos manguezais é a fonte de sedimento, pois a vegetação utilizar novas áreas de sedimentação para a expansão de sua cobertura vegetal (Godoy, 2015). Atividades como pecuária, agricultura e expansão urbana possuem um grande impacto na dinâmica de sedimentação, pois o desmatamento de áreas de vegetação para implementar espaços de produção agrícola, criação de animais e extração mineral tornam o solo mais sensível aos efeitos erosivos. Entretanto, os manguezais na Costa Norte do Brasil, relativamente bem preservado quando comparado aos de outras regiões do planeta (Tenório et al., 2015) estão expandindo em área (Nascimento et al., 2013). Acredita-se que esse aumento dos manguezais pode estar associado ao regime pluviométrico nas bacias hidrográficas costeiras e a quantidade de sedimentos e nutrientes transportados para os estuários amazônicos.

Diante desse cenário de sensibilidade dos manguezais as mudanças climáticas e pressão antrópica, o objetivo desta pesquisa é analisar a dinâmica das áreas de manguezal na zona costeira amazônica (Costa Norte do Brasil) a partir de dados de sensores remotos (imagens SAR e óticas) e hidrossedimentológicos (Vazão e Concentração de Sedimentos em Suspensão).

Os manguezais na Costa Norte do Brasil estão expandindo em área (Nascimento et al., 2013) e acredita-se que esse aumento pode estar associado ao regime pluviométrico nas bacias hidrográficas costeiras e a quantidade de sedimentos e nutrientes transportados para os estuários amazônicos. Para atingir esse objetivo geral e apresentar os resultados referentes a esta tese de doutorado, este trabalho está estruturado em cinco partes:

- Na primeira parte (Capítulo 2) faremos uma abordagem caracterizando a área de estudo nos seus aspectos hidrológicos, meteorológicos, pedológicos e social;
- Na segunda parte (Capítulo 3) será apresentado o mapeamento das áreas de manguezais na zona costeira amazônica (da foz do rio Oiapoque, Amapá, ao golfo maranhense, Maranhão) nas décadas de 1970, 1990 e 2000 utilizando como referência as imagens SAR das plataformas/sensores RADAM/GEMS (1975), JERS-1 (1996) e ALOS/PALSAR (2008). Neste capítulo são apresentados os resultados da detecção de mudanças das áreas de manguezal entre as décadas de 1970/1990 e 1990/2000 com objetivo de identificar o comportamento dinâmico das áreas colonizadas pelo mangue;

- Na terceira parte (Capítulo 4) analisou-se a relação entre a dinâmica dos manguezais na foz dos rios Araguari, Gurupi e Mearim (Baía de São Marcos) com as variações de carga sólida em suspensão (Qss) de cinco sub-bacias que deságuam na foz dos rios mencionados. Utilizou-se dados das estações fluviométricas e sedimentológicas da Agência Nacional de Águas localizadas nos rios Araguari (estação Porto Platon), Gurupi (estação Alto Bonito), Pindaré (estação Pindaré-Mirim), Grajaú (estação Aratoi Grande) e Mearim (estação Pedreiras II) para estimar a descarga sólida em suspensão nos rios. Foi analisada a descarga sólida a partir de dados médios anuais de 1977 a 2008 e relacionada com o comportamento dinâmico das áreas de manguezais (acresção, erosão e sem alteração) entre as décadas de 1970 a 1990 e 1990 a 2000;

- Na quarta parte (Capítulo 5) analisou-se as variações de vazão nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim a partir das anomalias de temperatura da superfície do mar nos oceanos Pacífico Equatorial Sul e Atlântico Tropical Norte. Essas anomalias interferem no regime de precipitação sobre a região Norte do Brasil, pois no Pacífico ocorre o fenômeno El Niño/La Niña e as anomalias do Atlântico influencia no posicionamento da Zona de Convergência Intertropical. Como a vazão reflete o volume precipitado em uma bacia hidrográfica conseguiu-se relacionar quais fenômenos influenciam mais no regime fluviométrico nas sub-bacias analisadas;

- Na quinta parte (Capítulo 6) analisou-se a relação da concentração de sedimentos em suspensão com a cobertura do solo nas sub-bacias hidrográficas dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim. O desmatamento para implementação de atividades econômicas (pecuária, agricultura, mineração, etc) podem influenciar no aumento da concentração de sedimentos em um rio dependendo do tipo de solo e áreas onde ocorreram os impactos antrópicos (áreas próximas de rios e com relevo acentuado). Investigou-se a relação da variação da concentração de sedimentos nos rios citados com o desmatamento nas sub-bacias e margens dos rios. Identificou-se as principais coberturas do solo (com cobertura vegetado, sem cobertura vegetal e pastagem) e relacionou-se com o aumento e diminuição de sedimentos nos rios. Além disso, averiguou-se a variação de sedimentos e sua relação com dados do censo agropecuário e de produção mineral para compreender a correspondência entre o aumento de atividades de agricultura e mineração com o aumento de sedimentos em suspensão em diferentes bacias hidrográficas.

Desta forma, concluiu-se que os manguezais na zona costeira amazônica estão expandindo em área e esta expansão possui relação com a cobertura do solo e uso, através das

atividades antrópicas nas bacias hidrográficas amazônicas. Nas áreas onde o balanço de deposição sedimentar nos estuários é negativo, percebe-se maior influência de processos naturais agindo na zona costeira (ação das correntes marinhas). Já nas áreas onde o balanço de deposição sedimentar é positivo, destacam-se processos antropogênicos nas bacias hidrográficas (desmatamento e práticas econômicas).

CAPÍTULO 2: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

A área de estudo localizada no litoral Norte do Brasil, mais especificamente na zona costeira amazônica, estende-se do extremo Norte do Amapá até o golfo maranhense (Figura 2.1).

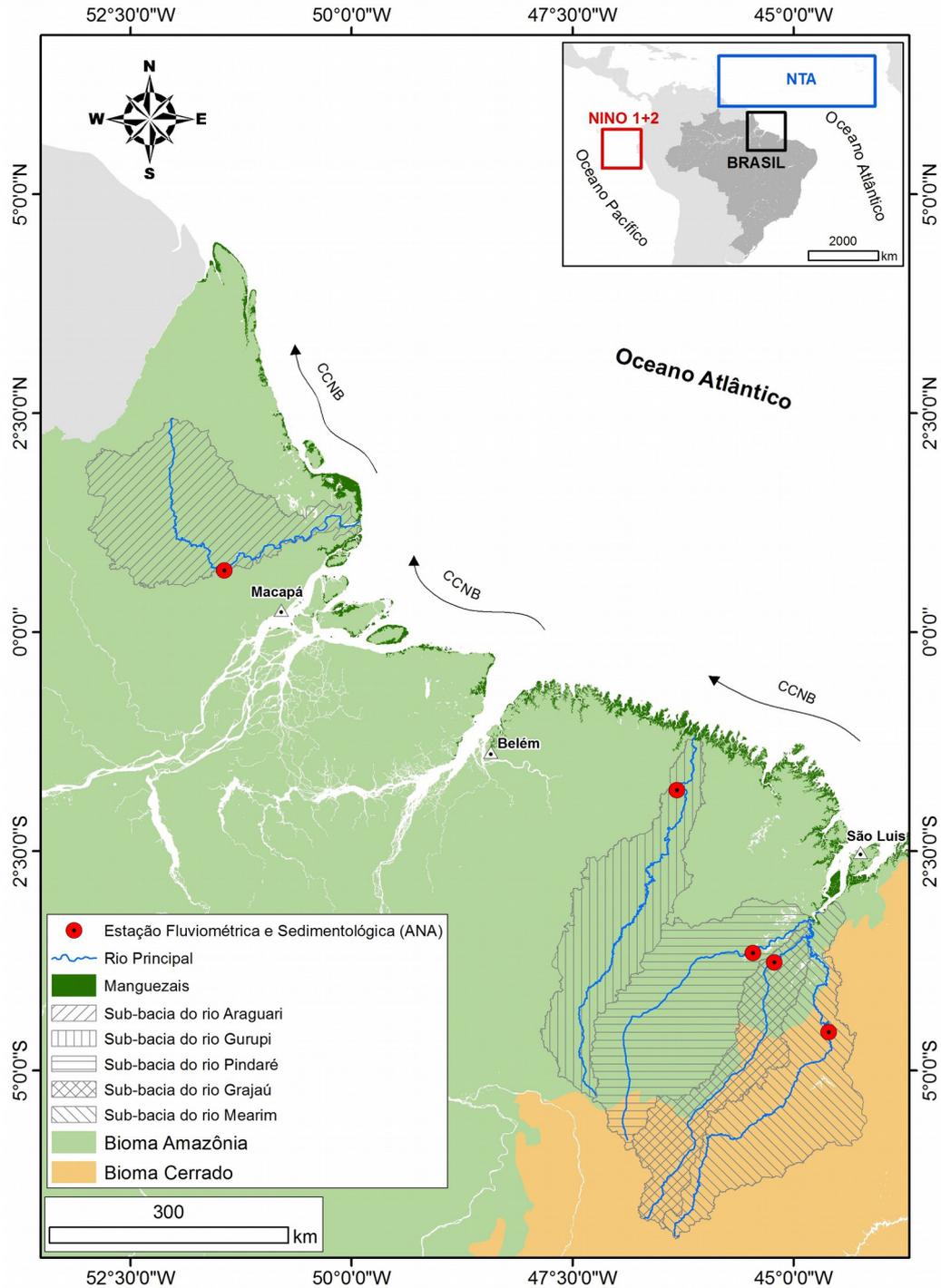


Figura 2.1: Localização da área de estudo.

Esta região é fortemente influenciada pela hidrodinâmica do rio Amazonas (Tessler & Goya, 2005), caracterizada por possuir planícies de grande extensão, de topografia baixa e frequentemente inundadas pelas marés.

O planalto costeiro da região é constituído por rochas do escudo Pré-cambriano das Guianas e em menores proporções por depósitos do Grupo Barreiras representados por sedimentos do tipo arenito, siltito e argilito (Avelar, 2002).

A área que abrange o litoral nordeste do Pará e noroeste do Maranhão possui um relevo baixo (0 a 80 m) e uma ampla planície costeira (atingindo até 70 km de largura) associada a uma extensa plataforma continental adjacente (aproximadamente 200 km de largura). A área é sujeita a um regime de macromarés semidiurnas (Souza Filho, 2005).

A região é predominantemente dominada pelo bioma Amazônia (figura 2.1) e apresenta uma transição para o bioma Cerrado no estado do Maranhão. O regime de precipitação é bastante variado. No Maranhão temos os menores registros de precipitação variando entre 500 a 1400 mm e temperatura média de 27°C. No Pará a temperatura média é de 27°C com precipitações variando de 1800 a 2800 mm. No Amapá a precipitação excede 3000 mm com temperatura do ar média de 28°C (INMET, 2016) (figuras 2.2 e 2.3).

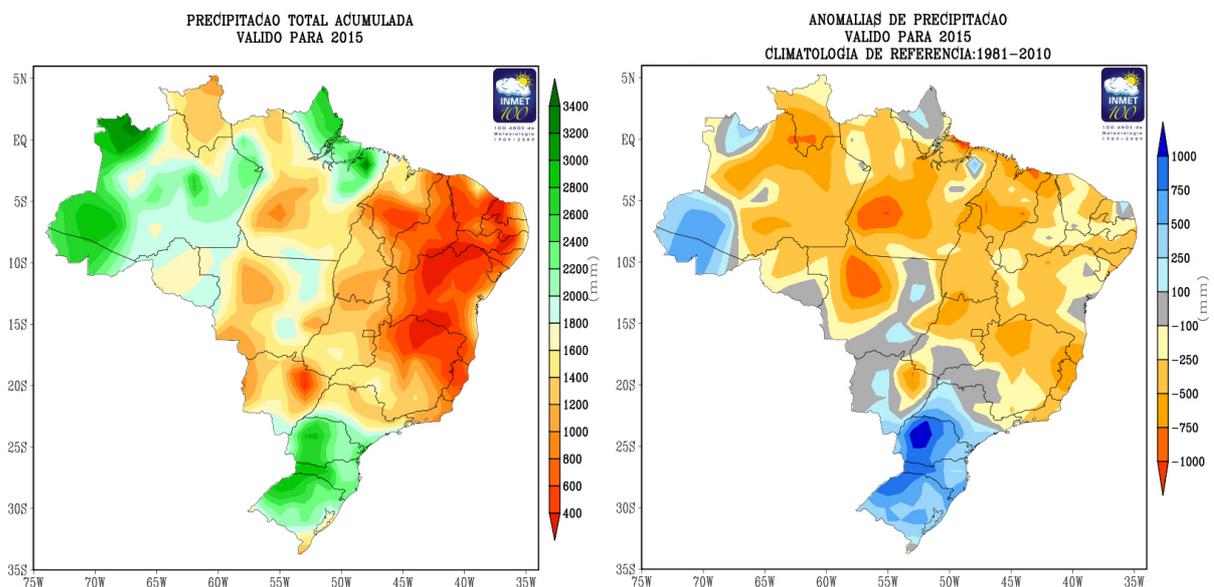


Figura 2.2: Precipitação total acumulada (2015) e anomalias de precipitação com base na normal climatológica de 1981 a 2010 (Fonte: INMET, 2016).

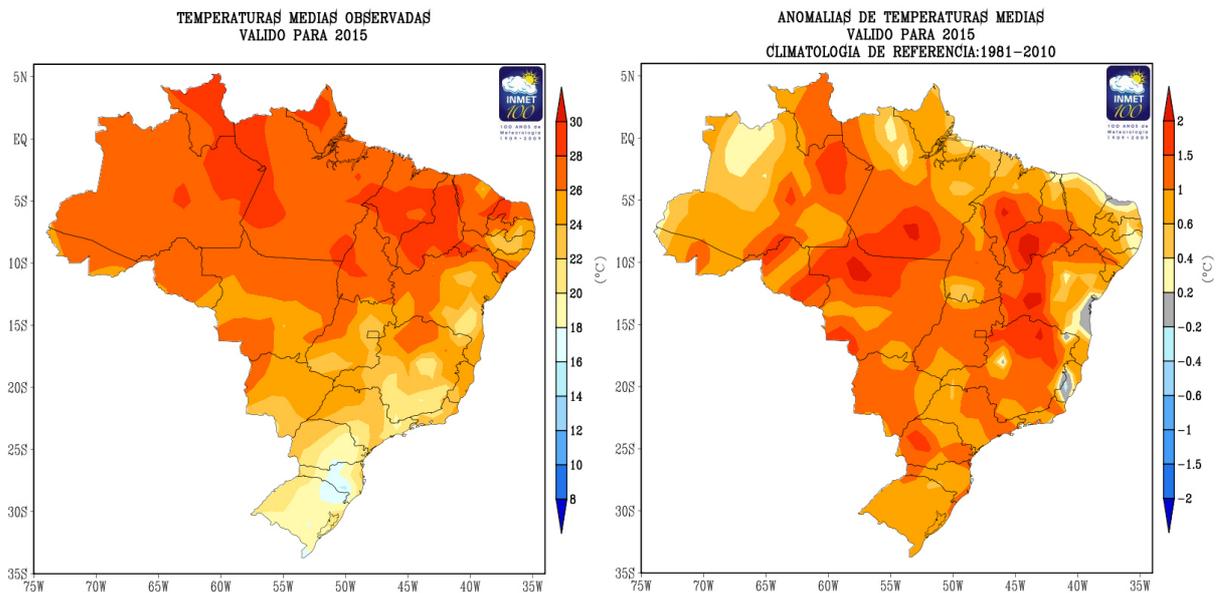


Figura 2.3: Temperatura média observada em 2015 e anomalias de temperatura com base na normal climatológica de 1981 a 2010 (Fonte: INMET, 2016).

De acordo com o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a Costa Norte é representada por duas importantes regiões hidrográficas: Amazônica e Atlântico Nordeste Ocidental definidas a partir da resolução nº 32, de 15 de outubro de 2003 (CNRH, 2015) (figura 2.4).

A Região Hidrográfica Amazônica é constituída pela bacia hidrográfica do rio Amazonas, rios da ilha de Marajó e rios do estado do Amapá que deságuam no oceano Atlântico Norte. Esta região contribui com com uma vazão média maior que 132.000 m³/s (mais de 73% do total de recursos hídricos do país) (ANA, 2014).

A Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental está situada no Estado do Maranhão e na porção Nordeste do Estado do Pará. Em grande parte dessa bacia, práticas agrícolas inadequadas estão influenciando processos erosivos e de salinização (ANA, 2014).

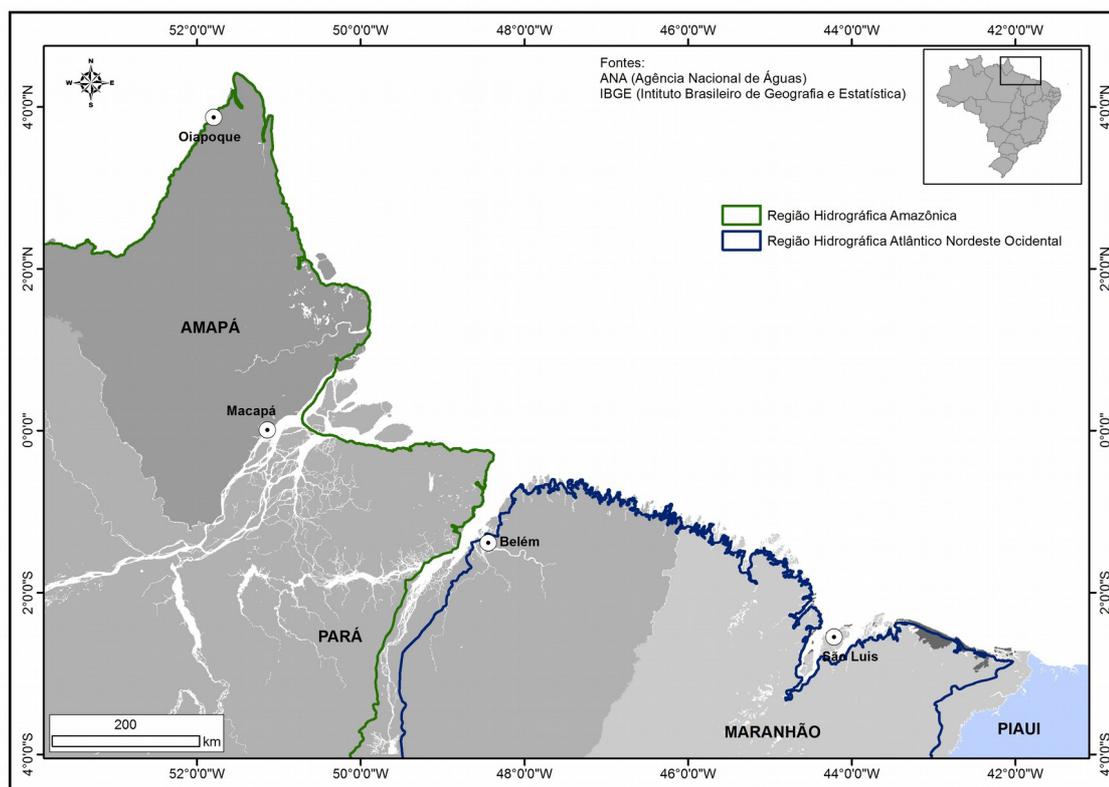


Figura 2.4: Divisão das regiões hidrográficas Amazônica e Atlântico Nordeste Ocidental de acordo com o CNRH, resolução nº 32.

Neste trabalho, foram selecionadas cinco sub-bacias na região para análise dos dados de vazão (apresenta colinearidade com a precipitação) e concentração de sedimentos em suspensão dos seus respectivos rios (Araguari-AP; Gurupi-PA/MA; Pindaré, Grajaú e Mearim-MA) (figura 2.1).

O rio Araguari possui uma extensa rede hídrica com aproximadamente 617 km de comprimento. O rio nasce na região noroeste da bacia hidrográfica em áreas de topografias mais elevadas (médias de 450 m acima do nível do mar) (Santos, 2012). O rio Araguari possui dois importantes afluentes: o rio Amapari é o maior em volume de água e contribui com aproximadamente 1/3 da vazão do rio Araguari; e o rio Falsino que contribui com aproximadamente 1/4 da vazão do rio Araguari (Santos, 2012).

O rio Gurupi é formado pela junção dos rios Açailândia e Itinga. A serra do Tiracambu é o principal divisor de águas da bacia do rio Gurupi com as bacias dos rios Pindaré e Turiaçu. Seu curso apresenta 719 km de extensão, sendo que aproximadamente 70% de sua bacia hidrográfica estão contidas no Estado do Maranhão e 30% no Estado do Pará (MMA, 2006).

O rio Pindaré nasce a leste de Montes Altos e tem como os rios Buriticupu, Negro, Paragominas, Zutiua, Timbira, Água Preta e Santa Rita como principais afluentes. Suas vazões sofrem variações representativas entre os períodos chuvoso e seco, decaindo para 30 m³/s no trimestre de setembro a novembro e alcançando 493 m³/s no trimestre de março a maio no município de Pindaré-Mirim (MMA, 2006).

O Rio Grajaú é o mais extenso curso de água da bacia do Mearim. Surge na serra da Cinta, no sudoeste do Estado do Maranhão deslocando-se de sudoeste para nordeste, drenando a porção central da Bacia do Mearim. A descarga média do rio é de 32 m³/s ao passar em Grajaú podendo atingir 131 m³/s ao passar em Aratoi Grande no seu baixo curso (MMA, 2006).

O índios guajajaras conhecem o rio Mearim como “*Izu*” que significa rio de águas pardacentas. Isso demonstra a grande quantidade de material em suspensão presente em suas águas. O rio nasce na confluência das serras Negra, Meninas e Crueiras percorrendo 1.150km no sentido sul-norte em direção ao litoral. Desemboca na baía de São Marcos, na altura da Ilha dos Caranguejos. É a maior bacia hidrográfica do Maranhão e da região hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental se considerados o rio Pindaré (que desagua a 20km de sua foz) e o Grajaú (que flui para o Mearim pelo canal de Rigó) (MMA, 2006).

A grande maioria do espaço rural, na bacia da região hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental, encontra-se ocupado com atividades agropecuárias, sendo que as atividades agrícolas localizam-se ao sul e leste do Estado do Maranhão, com a instalação de grandes projetos agrícolas voltados ao plantio de soja e arroz (MMA, 2006).

Na sub-bacia do Mearim há o predomínio da pecuária com grandes fazendas destinadas ao criatório de gado melhorado. Na Sub-bacia do Gurupi (região de Açailândia) há o predomínio de atividades agropecuárias e da silvicultura (MMA, 2006).

A retirada de madeira foi quase total na faixa de dezenas de quilômetros que margeia o rio Pindaré. Após o fim dessa matéria-prima, várias serrarias e indústrias madeireiras, que funcionam em Imperatriz, paralisaram suas atividades ou se transferiram para Açailândia. Os municípios de Amarante do Maranhão, Buriticupu e outras localidades nas proximidades das reservas madeireiras continuam sendo exploradas de forma indiscriminada. (MMA, 2006).

A exploração dos recursos na região tem procedência desde a década de 1960 e representa uma das regiões mais impactadas pelo desmatamento (figura 2.5).

As áreas situadas nos litorais do Maranhão e Pará são exploradas com atividades extrativas, nos mangues (cata de mariscos e crustáceos), e desenvolvimento de atividades

pecuárias com espécies rústicas, como o gado bubalino, nas demais áreas, inclusive naquelas sujeitas a alagamentos (MMA, 2006).

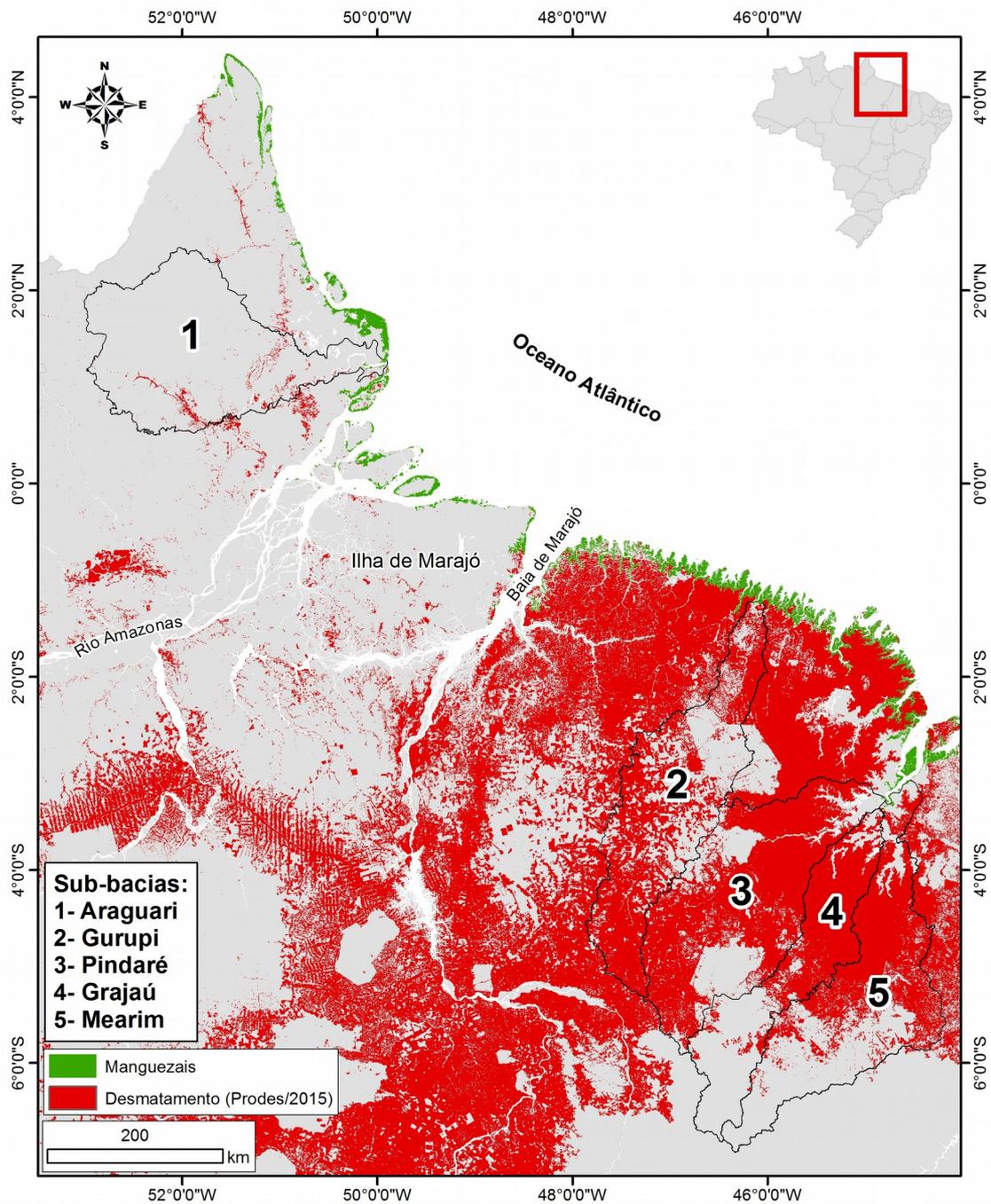


Figura 2.5: Áreas desmatadas em 2015 na zona costeira amazônica de acordo com os dados PRODES.

Em relação a economia regional dos municípios contidos nas áreas das cinco sub-bacias hidrográficas, destaca-se as atividades agropecuárias e de extrativismo vegetal. Predomina a criação de bovinos de corte em caráter extensivo na pecuária, mas há também a ocorrência de estabelecimentos que praticam essa exploração em regime intensivo. Na agricultura as pequenas lavouras de subsistência predominam em terrenos mais baixos e próximo ao litoral. Já nas chapadas da parte alta da região, onde predomina a vegetação de Cerrado, estão localizadas as lavouras modernas de médio e grande porte dedicadas à produção de grãos. (MMA, 2006).

No geral, os municípios possuem baixa densidade demográfica e índices de urbanização muito baixos. Nas áreas das sub-bacias estão localizados 97 municípios sendo 82 no estado do Maranhão, 9 no estado do Amapá e 6 no estado do Pará.

A população cresceu na área das sub-bacias analisadas de acordo com os dados do censo de 2000 e 2010 (figura 2.6).

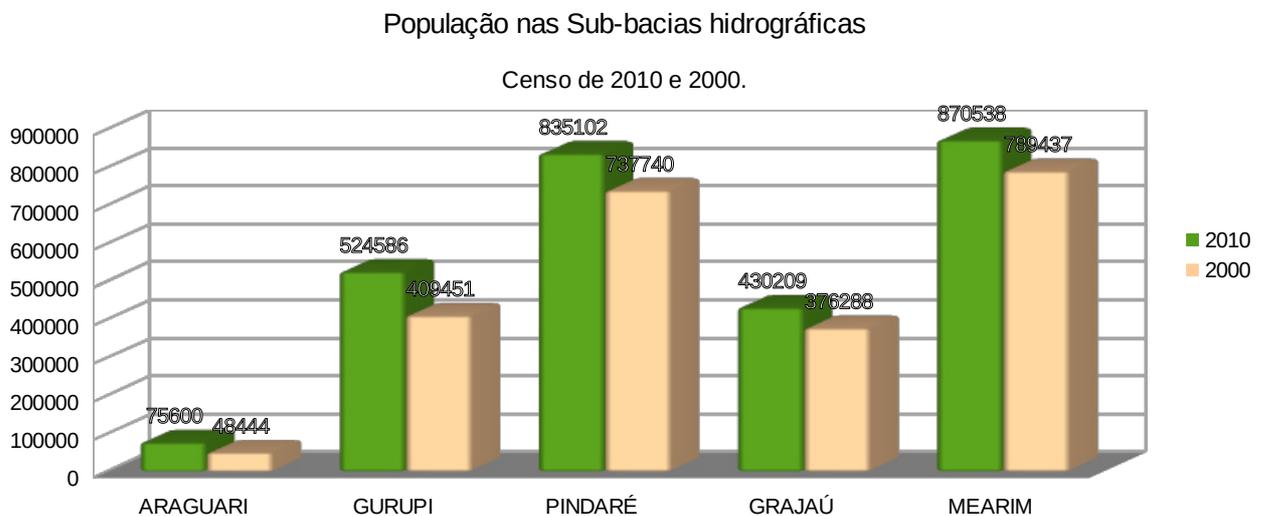


Figura 2.6: População nas sub-bacias de acordo com os dados do censo realizado nos anos de 2000 e 2010 (Fonte: IBGE, 2016).

A população urbana em 2010 nas sub-bacias apresentava um percentual maior em relação a população rural. A exceção a regra foi a sub-bacia do Grajaú que apresentou um percentual maior da população rural (54%) em relação a população urbana (46%) (figura 2.7).

População Urbana e Rural nas Sub-bacias hidrográficas

Censo 2010.

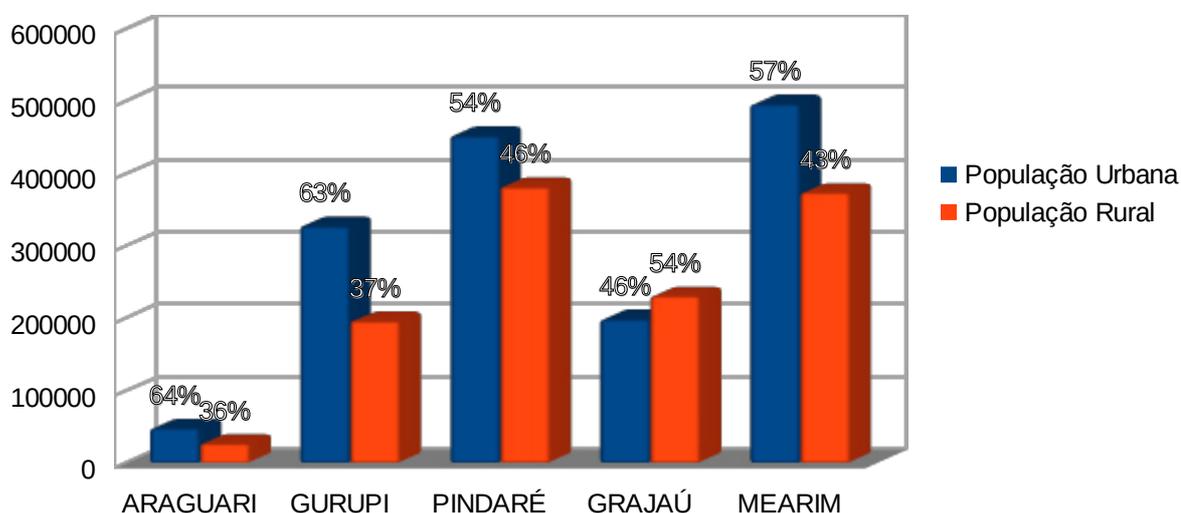


Figura 2.7: População urbana e rural nas sub-bacias de acordo com os dados do censo de 2010 (Fonte: IBGE, 2016).

A tabela 2.1 reúne informações sobre os principais solos nas sub-bacias hidrográficas analisadas. O levantamento foi realizado com base em arquivos digitais da EMBRAPA. Em todas as sub-bacias temos uma quantidade de argilossolo e latossolo bastante representativa. A sub-bacia do Araguari apresenta a maior porcentagem de latossolo (71%) e a sub-bacia do Grajaú (a menor sub-bacia analisada) o maior percentual de argilossolo (39%). Todas as sub-bacias são fontes de sedimentos finos (silte e argila) para a zona costeira adjacente.

Tabela 2.1: Área e percentual dos tipos de solo nas sub-bacias hidrográficas.

| SUB-BACIA DO ARAGUARI | | |
|------------------------------|-------------------------|----------------|
| SOLO | ÁREA (km ²) | PERCENTUAL (%) |
| Argilossolo Vermelho-Amarelo | 3794,40 | 10,02 |
| Gleissolo Háptico | 948,32 | 2,50 |
| Gleissolo Háptico | 1035,34 | 2,73 |
| Gleissolo Sálico | 185,76 | 0,49 |
| Latossolo Amarelo | 1973,82 | 5,21 |
| Latossolo Vermelho-Amarelo | 26906,04 | 71,04 |
| Corpos d'água | 447,10 | 1,18 |
| Neossolo Litélico | 203,27 | 0,54 |
| Plintossolo Pétrico | 2378,48 | 6,28 |
| TOTAL | 37872,52 | 100,00 |
| SUB-BACIA DO GURUPI | | |
| SOLO | ÁREA (km ²) | PERCENTUAL (%) |

| | | |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Argilossolo Vermelho-Amarelo | 4568,94 | 13,24 |
| Latossolo Amarelo | 17016,55 | 49,33 |
| Plintossolo Háptico | 12911,48 | 37,43 |
| TOTAL | 34496,97 | 100,00 |
| SUB-BACIA DO PINDARÉ | | |
| SOLO | ÁREA (km²) | PERCENTUAL (%) |
| Argilossolo Vermelho-Amarelo | 14568,62 | 36,43 |
| Gleissolo Sálico | 7,03 | 0,02 |
| Gleissolo Tiomórfico | 1235,16 | 3,09 |
| Latossolo Amarelo | 17068,12 | 42,68 |
| Luvissolo Cremico | 115,73 | 0,29 |
| Corpos d'água | 249,90 | 0,62 |
| Neossolo Flúvico | 633,95 | 1,59 |
| Plintossolo Háptico | 6111,68 | 15,28 |
| TOTAL | 39990,19 | 100,00 |
| SUB-BACIA DO GRAJAÚ | | |
| SOLO | ÁREA (km²) | PERCENTUAL (%) |
| Argilossolo Vermelho-Amarelo | 9237 | 39,1 |
| Gleissolo Tiomórfico | 385 | 1,6 |
| Latossolo Amarelo | 7217 | 30,6 |
| Luvissolo Cremico | 899 | 3,8 |
| Corpos d'água | 46 | 0,2 |
| Neossolo Flúvico | 1625 | 6,9 |
| Neossolo Litólico | 151 | 0,6 |
| Nitossolo Vermelho | 1837 | 7,8 |
| Plintossolo Háptico | 1576 | 6,7 |
| Vertissolo Cromado | 644 | 2,7 |
| TOTAL | 23618 | 100,0 |
| SUB-BACIA DO MEARIM | | |
| SOLO | ÁREA (km²) | PERCENTUAL (%) |
| Argilossolo Vermelho-Amarelo | 13054,97 | 37,35 |
| Gleissolo Sálico | 0,58 | 0,00 |
| Gleissolo Tiomórfico | 940,69 | 2,69 |
| Latossolo Amarelo | 14693,42 | 42,04 |
| Neossolo Flúvico | 137,91 | 0,39 |
| Neossolo Litólico | 293,20 | 0,84 |
| Nitossolo Vermelho | 927,20 | 2,65 |
| Plintossolo Háptico | 3011,53 | 8,62 |
| Plintossolo P | 276,62 | 0,79 |
| Plintossolo PTtrico | 1615,32 | 4,62 |
| TOTAL | 34951,43 | 100,00 |

CAPÍTULO 3: MAPEAMENTO DAS MUDANÇAS OCORRIDAS NOS MANGUEZAIS DA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA ENTRE 1975 E 2008 A PARTIR DE DADOS MULTISENORES.

3.1- INTRODUÇÃO.

A palavra “mangue” foi inserida na língua portuguesa pelos colonizadores portugueses no século XV após percorrer o litoral do Senegal. Em Senegal, Gâmbia, Casamanca e Guiné a palavra mangue possui a mesma pronúncia e era utilizada para designar os ambientes na faixa de entre marés ao longo de estuários, deltas, águas salobras interiores, lagoas e lagoas (Vannucci, 2002).

Os manguezais são ecossistemas costeiros que se originaram na região do oceano Índico e Pacífico e se disseminaram com o auxílio das correntes marinhas durante o processo de separação dos continentes. Estão presentes nas faixas tropical e subtropical do planeta, ocupando regiões tipicamente inundadas pelas marés (estuários, lagoas costeiras, baías e deltas). Os mangues podem ocorrer raramente em outro lugar, porém são quase exclusivamente tropical. Isto sugere uma limitação pela temperatura, embora possam sobreviver a temperaturas de até 5 ° C. Os manguezais são intolerantes à geada. Isso ocorre devido as mudas serem bastante vulneráveis às temperaturas baixas. Os Mangues compreendem cerca de 55 espécies em 20 gêneros pertencentes a 16 famílias. Essa diversidade dos mangues indica uma característica importante em relação ao hábito complexo de adaptações fisiológicas permitindo a sua sobrevivência e sucesso (Hogarth, 2007).

Estes ecossistemas podem ser utilizados para diversas atividades, tais como: turismo ecológico, educação ambiental, apicultura, piscicultura e criação de outras espécies marinhas, além de ser berçário de várias espécies de animais e vegetais (Karthiesan & Bingham, 2001). Portanto, apresentam um papel fundamental na sustentabilidade humana e servem de subsistência para comunidades tradicionais, principalmente em países em desenvolvimento (Saenger et al., 1983; Alongi, 2002). Os manguezais também protegem a zona costeira da ação de ondas, marés, pororocas e até mesmo tsunamis (Karthiesan & Rajendran, 2005; Alongi, 2008).

Alongi (2008) chama atenção para as alterações climáticas que podem levar a uma perda global nas florestas de manguezais, mas deve ser considerada de importância secundária quando comparada às atuais taxas médias anuais de desmatamento da ordem de 1 a 2% nas florestas de mangue. A degradação do manguezal vem ocorrendo com mais frequência devido

à exploração exaustiva dos recursos econômicos e a ocupação territorial sem planejamento ambiental (Hadlich & Ucha, 2007).

Giri et al. (2011) realizaram um amplo mapeamento dos manguezais no mundo com base em dados de satélites LANDSAT 5 e 7 para o ano 2000. Nesta data eles verificaram que os manguezais possuíam uma área de 137.760 km² representando 0,7% do total de florestas tropicais no mundo.

Devido a grande importância desse ecossistema, desde a década de 1980 são realizados trabalhos de mapeamento e detecção de mudanças das áreas de manguezais em nível global (Saenger et al., 1983; Spalding et al., 2009; Spalding et al., 1997; Giri et al., 2011).

No Brasil, Herz (1991) realizou o primeiro mapeamento em larga escala do país, a partir da interpretação visual de imagens do radar GEMS 1000 utilizado durante o Projeto RADAM Brasil. Na Amazônia, Souza Filho (2005), Souza Filho & Paradella (2002) e Souza Filho & Paradella (2005) realizaram o mapeamento dos manguezais do nordeste do Pará e litoral do Maranhão, a partir da interpretação visual de imagens LANDSAT 5 TM e produtos híbridos (fusão RADARSAT-1 com LANDSAT 5 TM). Outros trabalhos também realizaram o mapeamento dos ambientes costeiros na Costa Norte do Brasil a partir de sensores remotos gerando uma nova visão da zona costeira amazônica (Oliveira et al., 2015; Cardoso et al., 2014; Diniz et al., 2012; Rodrigues & Souza Filho, 2011; Santos et al., 2011; Silva et al., 2011; Batista et al., 2009; Boulhosa & Souza Filho, 2009; Teixeira & Souza Filho, 2009; Gonçalves et al., 2009; Silveira et al., 2004).

Prost (1997), Rebelo-Mochel (1997), Souza Filho & Paradella (2003) e Souza Filho et al. (2006) realizaram a quantificação de mudanças nas áreas de manguezais da Costa Amazônica. Nascimento Jr et al. (2013) realizaram o mapeamento e detecção de mudanças dos manguezais na região que abrange o setor litorâneo na região Norte do Brasil de Belém-PA até a Ponta do Tubarão-MA.

Os trabalhos citados acima são frutos de técnicas de classificação visual e automática. Dentre as técnicas automáticas de classificação temos a pixel a pixel que fornece mais informações quantitativas e replicáveis quando comparadas com a interpretação visual. Green et al. (1998) avaliou diferentes métodos de mapeamento de manguezal baseado na classificação de pixels, fazendo uma análise comparativa entre elas. O inconveniente deste método é o efeito “granulado” observado nos mapas oriundos das classificações, devido às

variações randômicas da resposta do sensor as características intrínsecas do dossel das florestas (Lobo 1997).

O método de classificação conhecido como GEOBIA (Geographic object-based image analysis) teve seu desenvolvimento associado ao avanço das técnicas de segmentação de imagens (Blaschke, 2010). Esta técnica objetiva dividir imagem digital em regiões homogêneas e espacialmente contínuas, denominadas objetos (Flanders et al., 2003). Métodos de classificação orientados a objetos combinam a análise de contexto, possível anteriormente apenas durante o processo de interpretação visual, com o aspecto espectral quantitativo do processo de classificação pixel a pixel (Walter, 2004). Portanto, a classificação orientada a objeto reduz a variação espectral local, induzindo a uma melhor discriminação das diferentes classes mapeadas (Lobo, 1997).

GEOBIA (Geographic object-based image analysis) surgiu como uma alternativa ao paradigma tradicional da classificação baseada em pixel. A ideia dessa abordagem é deslocar a unidade básica do pixel para objetos de imagem (agrupamento de pixels). Dessa forma pode-se emular (ou exceder) a interpretação visual e fazer melhor uso da informação espacial presente nas imagens de sensoriamento remoto, possibilitando maior integração com os sistemas de informações geográficas (Hay & Castilla, 2008).

Diante de novos produtos de sensoriamento remoto e técnicas de processamento digital de imagens, surgem novas idéias no campo de mapeamento dos manguezais visando superar as limitações impostas pela natureza da imagem (SAR ou Ótico) e pelas ferramentas de processamento de imagem (classificação baseada no pixel).

O objetivo deste trabalho é mapear os manguezais da zona costeira amazônica nas décadas de 1970, 1990 e 2000 a partir de imagens SAR (RADAM/GEMS; JERS-1; ALOS/PALSAR) e óticas (LANDSAT 5 TM) utilizando análise de imagem baseada em objeto. A partir deste objetivo vamos obter a quantificação de área dos manguezais nas décadas de 1970, 1990 e 2000 e realizar a detecção de mudanças entre as décadas de 1970/1990 e 1990/2000 para identificar a dinâmica das áreas de manguezais (áreas em acreção, erosão e inalteradas).

3.2- MATERIAIS E MÉTODOS.

Para realizar esta etapa da pesquisa, foram utilizadas imagens de satélite orbitais e modelo digital de elevação (1) que serão submetidas a segmentação multiresolução para classificar os manguezais nas décadas de 1970, 1990 e 2000 (2). O resultado da classificação das áreas de manguezais será submetida a nova segmentação para detectar as mudanças entre as décadas de 1970/1990 (3) e 1990/2000 (4). A figura 3.1 resume os passos e sequência realizadas.

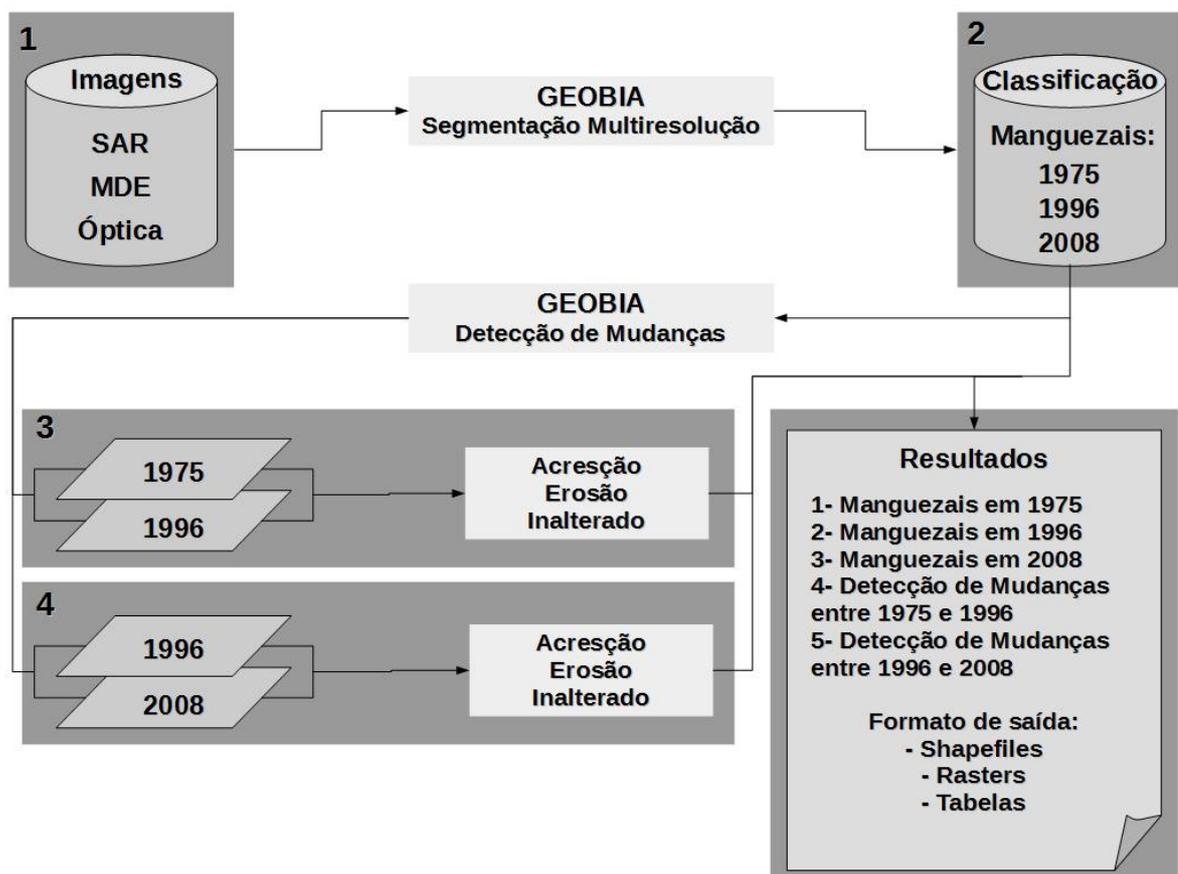


Figura 3.1: Fluxograma destacando os passos realizados no capítulo 3.

Utilizou-se dados de sensores remotos oriundos de plataformas orbitais distintas (Tabela 3.1). Para classificar as imagens aplicamos a abordagem orientada a objetos (GEOBIA) de dados multi-sensores.

Tabela 3.1: Características dos sensores remotos utilizados.

| PLATAFORMA/ SENSOR | NATUREZA | RESOLUÇÃO ESPECTRAL | RESOLUÇÃO ESPACIAL | POLARIZAÇÃO | RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA |
|-----------------------|----------|---------------------------|-----------------------|-------------|---------------------------|
| LANDSAT/TM | ÓTICO | MULTIESPECTRAL (7 FAIXAS) | 30 m | --- | 8 bits |
| LANDSAT/MSS | ÓTICO | MULTIESPECTRAL (5 BANDAS) | 79 m | --- | 6 bits |
| ALOS/PalSAR | SAR | BANDA L | 10 m | HH | 16 bits |
| JERS-1/SAR | SAR | BANDA L | 18 m | HH | 8 bits |
| SRTM/SIR | SAR | BANDA C | 90m | VV, HH (C) | 16 bits |
| RADAM/GEMS | SAR | BANDA X | 16 m | HH | 8 bits |

As imagens ALOS/ PALSAR e JERS-1/SAR foram adquiridas no âmbito dos projetos “Kyoto & Carbon Initiative”, iniciado em 2001, e “Global Rain Forest Mapping”, iniciado em 1995. Ambos projetos são de colaboração internacional entre a JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) e instituições interessadas em dados ambientais obtidos por radares imageadores.

As imagens RADAM/GEMS foram disponibilizadas em formato digital pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). As imagens LANDSAT e o Modelo Digital de Elevação SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) estão disponibilizadas no portal GLCF (Global Land Cover Facility) e na Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGI/INPE).

As imagens SAR (ALOS/PALSAR, JERS-1 e RADAM/GEMS) foram adquiridas com registro geométrico. Para aferir a qualidade do registro dessas imagens, comparamos a posição entre as imagens SAR e imagens óticas ortorretificadas LANDSAT 8 OLI. A precisão do registro era satisfatória não sendo necessário realizar nova ortorretificação nas imagens SAR.

Apenas as imagens óticas LANDSAT 5 TM não apresentavam registro geométrico aceitável. Dessa forma, as cenas LANDSAT foram submetidas a ortorretificação.

Na tabela 3.2 são listadas as cenas LANDSAT MSS e TM corrigidas geometricamente e utilizadas na classificação dos manguezais para as décadas de 1970, 1990 e 2000.

Tabela 3.2: Data das imagens óticas LANDSAT MSS (década de 1970) e TM (décadas de 1990 e 2000) utilizadas na classificação das áreas de manguezais na zona costeira amazônica.

| 1970 | | 1990 | | 2000 | |
|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| Path/Row | Data | Path/Row | Data | Path/Row | Data |
| 240/61 | 22/08/1973 | 220/62 | 19/06/1995 | 220/62 | 10/09/2008 |
| 240/60 | 22/08/1973 | 221/61 | 18/08/1997 | 221/61 | 29/07/2007 |
| 241/60 | 23/08/1973 | 221/62 | 16/10/1995 | 221/62 | 24/06/2008 |
| 236/62 | 03/07/1975 | 222/62 | 13/05/1995 | 222/62 | 20/06/2008 |
| 237/61 | 14/07/1973 | 223/60 | 21/06/1995 | 223/60 | 13/07/2008 |
| 237/62 | 14/07/1973 | 223/61 | 13/08/1996 | 223/61 | 13/07/2008 |
| 238/61 | 05/06/1979 | 224/60 | 12/11/1997 | 224/60 | 08/08/2006 |
| 239/61 | 03/08/1973 | 225/58 | 15/09/1997 | 225/58 | 05/12/2006 |
| 239/60 | 03/08/1973 | 225/59 | 27/08/1996 | 225/59 | 13/09/2006 |
| 243/57 | 18/10/1973 | 225/60 | 27/08/1996 | 225/60 | 26/10/2006 |
| 242/58 | 07/10/1975 | 226/57 | 09/11/1997 | 226/57 | 06/08/2006 |
| 242/59 | 18/12/1975 | 226/58 | 28/04/1996 | 226/58 | 24/07/2007 |
| 241/59 | 05/08/1973 | ----- | ----- | ----- | ----- |

O critério para seleção das cenas acima está relacionado com o percentual de nuvens. As imagens escolhidas para os Estados do Pará e Maranhão possuem cobertura de nuvens inferior a 50% do total imageado. As imagens do Amapá apresentaram grande quantidade de nuvens (acima de 50%), porém não representou obstáculo para a classificação dos manguezais já que as imagens radargramétricas possibilitaram a identificação das áreas de mangue com o auxílio do mapeamento realizado por Herz (1991).

Para realizar a ortorretificação das imagens LANDSAT MSS e TM, utilizamos o software PCI Geomatics. As 37 cenas foram registradas utilizando as imagens LANDSAT 8 OLI ortorretificadas e o Modelo Digital de Elevação SRTM adquiridos no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS - United States Geological Survey).

Foi identificado um intervalo espectral que melhor separa o manguezal de outros alvos que não possuem interesse direto no processo de classificação. A faixa espectral do infravermelho médio mostra uma interação da radiação eletromagnética com a turgidez ou quantidade de água nas plantas.

Devido a vegetação de mangue ser constantemente inundada pela maré, a presença de água salobra disponível para a vegetação e ao entorno influencia a reflectância da vegetação

na faixa espectral infravermelha. Sendo assim, a resposta espectral da vegetação de mangue é identificada com valores baixos no infravermelho devido à absorção da radiação pela água. Dessa forma, as faixas espectrais com comprimentos de onda entre 1,55-1,75 μm (sensor TM) e 0,8-1,1 μm (sensor MSS) permitiram melhor discriminação dos manguezais.

Aplicou-se a correção atmosférica nas imagens LANDSAT MSS utilizando o método DOS (Dark Object Subtraction) (Chavez, 1988). Este método utiliza os pixels escuros que deveriam assumir resposta espectral nula, como sombras e nuvens em faixas espectrais do visível e corpos de água límpidos na faixa do infravermelho. A metodologia consiste em selecionar um conjunto de pixels escuros e obter o valor médio que será subtraído na imagem, pois esse valor representa o excedente resultante do espalhamento atmosférico. As imagens LANDSAT TM foram calibradas radiometricamente utilizando o algoritmo ATCOR.

Após a etapa de pré-processamento, as imagens foram segmentadas e classificadas utilizando o software eCognition 8. A classificação baseada em segmentos possibilita definir de forma mais precisa os objetos classificados. Contudo, podemos extrapolar a informação espectral dos segmentos quando utilizamos a abordagem baseada em objetos, pois ela acrescenta as características espaciais do segmento (área, perímetro, distância, vizinhança, topologia, etc) proporcionando mais opções durante a classificação (Blaschke, 2010).

O eCognition apresenta várias formas de segmentar uma imagem ou conjunto de imagens. Normalmente, o processo de segmentação é aplicado apenas em uma única imagem de satélite (Flanders et al., 2003, Wulder et al., 2009). Neste estudo, assim como no estudo apresentado por (Desclée et al., 2006), os objetos foram definidos em uma única operação realizada no conjunto de imagens SAR e óticas, utilizando todas elas de modo sequencial. Esta abordagem, definida como segmentação multirresolução, está fundamentada em informação espacial, espectral e temporal para delinear objetos adequados, de modo que os pixels dos objetos apresentam características espectro-temporal similares (Desclée et al., 2006). Portanto, utilizaremos o algoritmo de segmentação multiresolução para segmentar um conjunto de imagens com características diferentes (SAR, Ótica e MDE).

A segmentação multiresolução necessita de parâmetros como escala, peso, forma/brilho e compacidade/suavidade. O parâmetro escala determina a heterogeneidade máxima permitida aos segmentos. A variação do valor da escala controla a extensão dos segmentos sendo os mais heterogêneos menores e os mais homogêneos maiores (Lang & Tiede, 2007).

As imagens podem ser utilizadas de forma diferenciada de acordo com suas características (e.g. resolução espacial e espectral) e importância para o resultado da segmentação e classificação. O parâmetro peso determina essa importância, pois quanto maior o peso para uma camada significa que ela será mais utilizada durante a segmentação (Lang & Tiede, 2007).

Para classificar os manguezais e identificar as mudanças nas áreas (acrescimento, erosão e sem alteração) utilizou-se a metodologia adotada por Nascimento Jr. et al. (2013). As imagens possuem forma e brilho, porém podemos ressaltar um em relação ao outro de acordo com o interesse na segmentação. O mesmo acontece com a compactidade e suavidade, pois as imagens apresentam segmentos com formas e brilhos diferentes e com delimitações compactas ou suaves (tabela 3.3).

Tabela 3.3: Parâmetros utilizados na segmentação multiresolução para a classificação dos manguezais nas décadas de 1970, 1990 e 2000 - Adaptado de Nascimento Jr et al. (2013).

| Algoritmo | Segmentação multiresolução |
|------------------------|----------------------------|
| Escala | 20 |
| Peso | SAR – 15 |
| | MDE – 10 |
| | Óptica – 3 |
| Forma/Brilho | 0.1/0.9 |
| Compactidade/Suavidade | 0.5/0.5 |

Foram utilizadas algumas equações aritméticas elaboradas para auxiliar a classificação. Os valores obtidos nas equações são respostas médias dos segmentos gerados a partir do processo de segmentação multiresolução (tabela 3.4).

Tabela 3.4: A tabela apresenta as equações aritméticas elaboradas por Nascimento et al. (2013) para auxiliar a classificação dos manguezais nas décadas de 1970, 1990 e 2000. Os limiares obtidos são valores médios dos segmentos resultantes da operação aritmética realizada nas equações.

| DESCRIÇÃO | EQUAÇÃO | Limiares | | |
|-------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | | 1970 | 1990 | 2000 |
| Equação SAR | $10 * \text{Log}(\text{Média SAR})$ | 18 – 23,7 | 18 – 23,7 | 23 – 38.6 |
| Equação 1 | $[10 * (\text{Média B5 LANDSAT}) + (\text{Média MDE})]$ | X | 200 – 600 | 200 – 600 |
| Equação 2 | $[10 * (\text{Média MDE}) + [10 * \text{Log}(\text{Média SAR})]$ | X | 100 - 250 | 100 - 250 |
| MDE | Média MDE | X | 9 – 21 | 9 – 21 |
| LANDSAT MSS | Mean MSS | 8 - 18 | X | X |

O algoritmo de segmentação multiresolução funde pixels formando objetos, ou seja, gera segmentos com informações além do valor médio dos pixels agrupados. Podemos identificar outras características como forma, textura, área, relação de vizinhança, suavidade, compacidade, etc. A escala faz referência ao tamanho dos segmentos, ou seja, valores maiores de escala resultam em segmentos maiores e vice-versa. O peso representa uma ponderação por imagem utilizada na segmentação. Podemos definir pesos ou importância para as imagens segmentadas que apresentam maior destaque para a formação de objetos com os alvos de interesse. Forma e brilho são utilizados conjuntamente na segmentação e é possível analisar o brilho (digital number) do pixel e a forma que um grupo de pixels podem resultar. Em trabalhos onde analisamos a reflectância dos alvos utilizamos brilho maior que a forma. A tabela 3.3 apresenta os valores referentes a forma (0.1 ou 10%) e ao brilho (0.9 ou 90%) utilizados neste trabalho. Compacidade e suavidade também são analisados em uma escala de 0 a 1 (0 a 100%) e neste trabalho adotou-se valores 0.5 (50%) cada uma.

O processo de classificação foi estruturado em uma árvore de decisão que reúne todas as etapas e algoritmos utilizados. Para cada década (1970, 1990 e 2000) os manguezais foram classificados obedecendo a sequência de segmentação, classificação, agrupamento, reclassificação, reagrupamento e exportação do resultado.

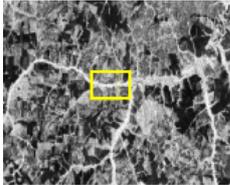
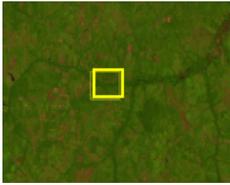
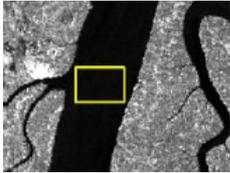
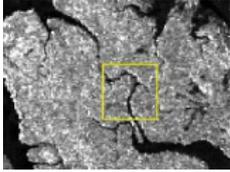
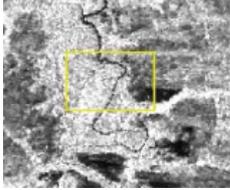
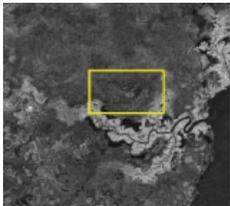
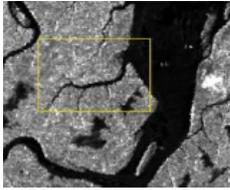
Foram utilizadas outras descrições ou informações dos segmentos no processo de classificação (tabela 3.5). Essas informações são geradas no próprio software eCognition após a segmentação ser realizada. Foram utilizados os descritores “Area” (descreve a área do segmento a partir da quantidade de pixels), “Relational Border to” (mostra a porcentagem de borda do segmento analisado em contato com outros segmentos) e “Distance to” (mede a distância em pixels de um segmento ou grupo de segmentos pertencentes a uma classe em relação a outros segmentos).

Tabela 3.5: Árvore de Decisão ou sequência de processamento para a classificação dos manguezais utilizada por Nascimento Jr. et al. (2013). O modelo refere-se a classificação dos manguezais na década de 2000, porém a sequência de classificação permanece a mesma para as décadas de 1990 e 1970 substituindo apenas as equações.

| PROCESSO | PROCESSO FILHO | ALGORITMO | FUNÇÃO/CONDIÇÃO | DESCRITOR |
|------------------------------|---|------------------------------|--|---|
| (1) SEGMENTAÇÃO | | Multiresolution segmentation | | |
| (2) CLASSIFICAÇÃO | (2.1) Classificar classe Continente | Assign class | Equação SAR $10\text{LOG}(\text{SAR BANDA L}) \geq 23$ | EQUAÇÃO SAR |
| | (2.2) Classificar classe Massa d'água | Assign class | Equação SAR $10\text{LOG}(\text{SAR BANDA L}) < 23$ | EQUAÇÃO SAR |
| | (2.3) Classificar classe Manguezal pertencendo a classe Continente | classification | Equação 1 $[10 * (\text{mean B5 LANDSAT}) + (\text{mean MDE})]$ 200 - 600 | EQUAÇÃO 1 |
| (3) AGRUPAR | Agrupar segmentos da classe Massa d'água | Merge region | | |
| (4) RECLASSIFICAR | (4.1) Reclassificar classe Manguezal como Vegetação Secundária | classification | *Area ≤ 400000 pxl *Rel. border to Continente ≥ 0.12 | Area Rel. border to |
| | (4.2) Reclassificar Massa d'água como Campos e Lagos | classification | Área < 25000 pxl | Area |
| | (4.3) Reclassificar Continente como Manguezal sob nuvem | classification | *Distance to Manguezal ≤ 130 pxl *Mean MDE 10 - 21 *Rel. border to Manguezal ≤ 0.9 Equação 2 *[$10 * (\text{mean MDE}) + (\text{mean } 10 * \text{Log SAR})$] 100 - 250 | Distance to Mean Rel border to EQUAÇÃO 2 |
| (5) AGRUPAR | Agrupar classes | Merge Region | | |
| (6) EXPORTAR | Exportar classes | Export Vectors | | |

A tabela 3.6 apresenta as classes utilizadas por Nascimento et al. (2013) na árvore de classificação descrita na tabela 3.5.

Tabela 3.6: Classes identificadas e utilizadas na árvore de decisão para a classificação dos manguezais. Os retângulos amarelo indicam a área aproximada aonde foram obtidas o registro fotográfico (Tabela adaptada de Nascimento et al., 2013).

| Classe | Descrição | Imagem SAR | Imagem ótica | Fotografia |
|--------------------------------|--|---|--|---|
| Continente | Máscara para planície emersa e planalto costeiro |  |  |  |
| Massa d'água | Massa d'água geral: rios; canais de maré; estuários; mar. |  |  |  |
| Manguezal | Vegetação de mangue. |  |  |  |
| Vegetações secundárias | Vegetações com resposta espectral de mangue. |  |  |  |
| Áreas de campos e lagos | Áreas urbanizadas, presença de campos, solo exposto e lagos. |  |  |  |
| Nuvens | Nuvens substituídas por áreas com a presença de mangue. |  |  |  |

A primeira etapa de classificação foi realizada gerando como resultado final a extensão dos manguezais nas décadas de 1970, 1990 e 2000. O passo seguinte foi obter as mudanças referente a dinâmica das áreas de manguezal (redução, expansão e sem alteração). Os resultados da primeira etapa foram submetidos a nova segmentação realizada em pares, ou seja, a detecção de mudanças ocorrida entre as décadas de 1970-1990, 1990-2000 e 1970-2000. Na detecção de mudanças o eCognition possibilita usar níveis de segmentação. Assim conseguimos realizar a detecção de mudanças em três níveis, ou seja, no segundo e terceiro nível realizamos a classificação dos manguezais para cada década e no primeiro classificamos as mudanças entre esses anos (tabela 3.7).

Foi elaborada uma nova árvore de decisão para reunir a sequência de processamento, algoritmos e regras. Novos parâmetros de segmentação foram usados, sendo a escala igual a 10, forma/brilho com valores 0.1 e 0.9, compacidade/suavidade com 0.5 cada.

Tabela 3.7: Árvore de Decisão ou sequência de processamento para a classificação das mudanças nas áreas de manguezais entre as décadas de 1970/1990 e 1990/2000 utilizada por Nascimento Jr. et al. (2013). A sequência abaixo demonstra o exemplo da detecção de mudanças entre as décadas de 1990 e 2000.

| PROCESSO | PROCESSO FILHO | ALGORITMO | NIVEL | FUNÇÃO/ CONDIÇÃO | DESCRITOR |
|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-------|---|--------------------------|
| (1) SEGMENTAÇÃO | (1.1) Segmentação das imagens | Multiresolution segmentation | 1 | | |
| | (1.2) Cópia da segmentação | Copy image object level | 2 | Copiar abaixo do nível 1 | |
| | (1.3) Cópia da segmentação | Copy image object level | 3 | Copiar abaixo do nível 2 | |
| (2) CLASSIFICAÇÃO | (2.1) Classificar manguezal 1990 | classification | 2 | Mean 1990 = 0 | Mean 1990 |
| | (2.2) Classificar manguezal 2000 | classification | 3 | Mean 2000 = 0 | Mean 2000 |
| (3) DETECÇÃO DE MUDANÇAS | (3.1) Classificar manguezal acrescido | classification | 1 | * Existence of sub objects manguezal 2000 = 1 *Existence of sub objects manguezal 1990 = 0 | Existence of sub objects |
| | (3.2) Classificar manguezal erodido | classification | 1 | *Existence of sub objects manguezal 2000 = 0 *Existence of sub objects manguezal 1990 = 1 | Existence of sub objects |

| | | | | | |
|-------------------------|--|----------------|---|--|--------------------------|
| | (3.3) Classificar manguezal não alterado | classification | 1 | *Existence of sub objects manguezal 2000 = 1 *Existence of sub objects manguezal 1990 = 1 | Existence of sub objects |
| (4) AGRUPAR | Agrupar classes | Merge Region | | | |
| (5) EXPORTAR | Exportar classes | Export Vectors | | | |

3.3- RESULTADOS.

Os resultados na tabela 3.8 demonstram que os manguezais na Costa Norte estão em processo de expansão de área. De 1970 a 1990 houve um acréscimo de 188 km² e de 1990 a 2000 a expansão chegou a 619 km². O crescimento de área não é proporcional se observarmos a diferença de 20 anos entre 1970 a 1990 e de 10 anos para o período de 1990 a 2000.

De 1970 a 1990 houve uma expansão em área de manguezal de 1,76% num intervalo de 20 anos. Na década seguinte a expansão se acentuou e registrou um aumento de 5,71% em relação a área mapeada em 1990.

Tabela 3.8: Quantificação das áreas de manguezais na Costa Norte e nas regiões hidrográficas Amazônia e Atlântico Nordeste Ocidental.

| DÉCADA | Costa Norte (km²) | R. H. Amazônia (km²) | R. H. Atlântico Nordeste Ocidental (km²) |
|---------------|-------------------------------------|--|--|
| 1970 | 10.654 | 4.293 | 6.361 |
| 1990 | 10.842 | 4.139 | 6.703 |
| 2000 | 11.461 | 4.039 | 7.422 |

Os manguezais amazônicos estão situados em duas regiões hidrográficas de acordo com a Agência Nacional de Águas: Amazônica e Atlântico Nordeste Ocidental (Figura 2.4). A Região Hidrográfica Amazônica é constituída pela bacia hidrográfica do rio Amazonas e as bacias dos rios que deságuam no oceano Atlântico Norte no Estado do Amapá. A Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental abrange o litoral do estado do Maranhão e o litoral Nordeste do Estado do Pará (ANA, 2014).

Observando os resultados por região hidrográfica, verificamos que a Amazônica apresenta uma redução na área de manguezais ao longo de 4 décadas, ou seja, de 1970 a 1990

houve uma diminuição de 154 km² e de 1990 a 2000 a redução foi de 100 km². As taxas de redução no período de 1970 a 1990 corresponde a 3,58% e de 1990 a 2000 foi de 2,41%.

Na região hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental ocorreu um aumento das áreas de manguezal sendo que de 1970 a 1990 a expansão foi de 342 km² e de 1990 a 2000 foi de 719 km². Apesar de possuir disponibilidade de recursos hídricos inferior a bacia Amazônica, os manguezais expandiram apresentando taxas surpreendentes. De 1970 a 1990 os manguezais cresceram a uma taxa de 5,37% enquanto de 1990 a 2000 o crescimento foi de 10,72%. As figuras 3.2 e 3.3 ilustram as modificações observadas na área de estudo.

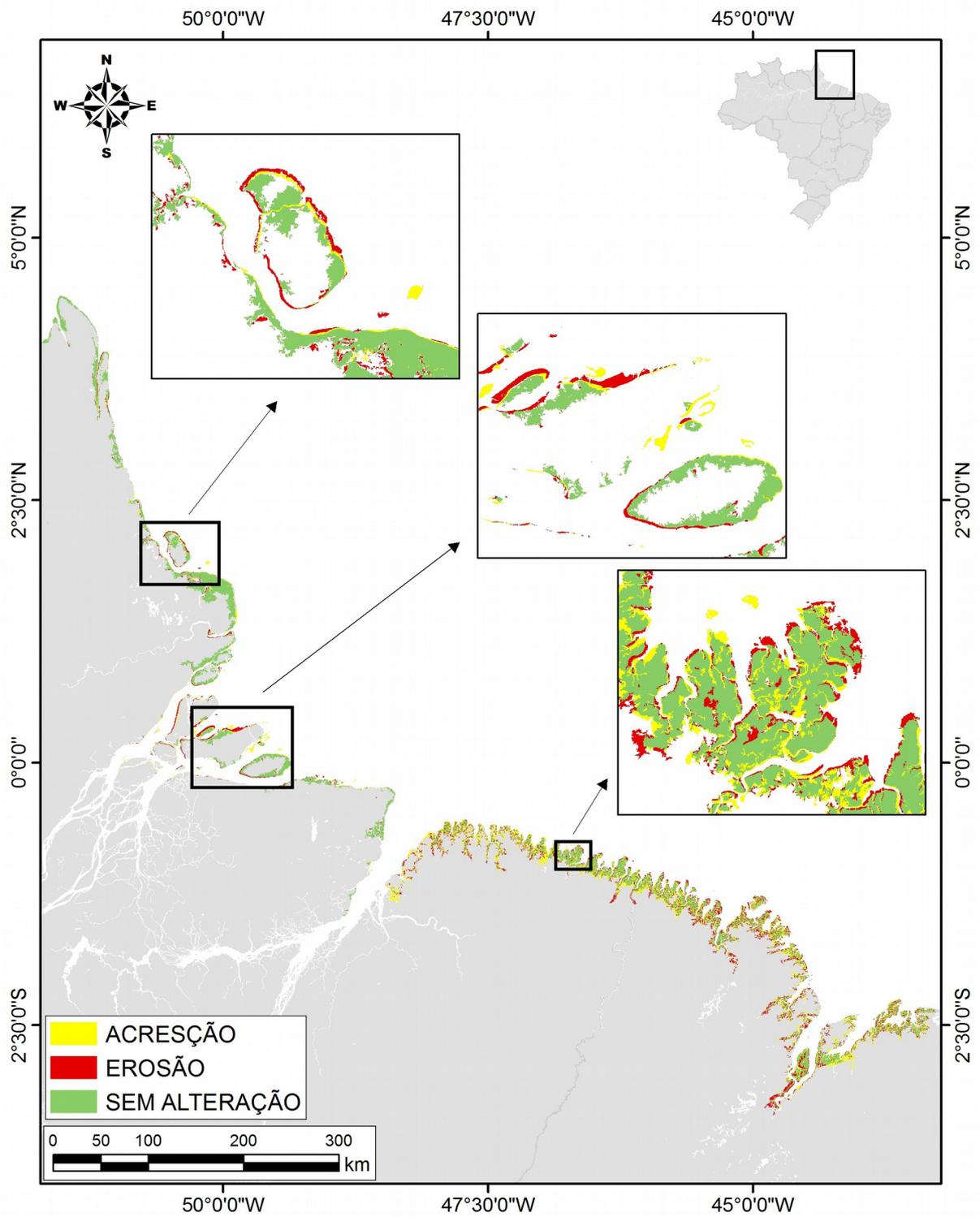


Figura 3.2: Detecção de mudanças nos manguezais da zona costeira amazônica entre as décadas de 1970 e 1990. Os retângulos destacam detalhes das mudanças na Ilha de Maracá (AP), Ilhas de Mexiana e Caviana (PA) e no município de Bragança (PA).

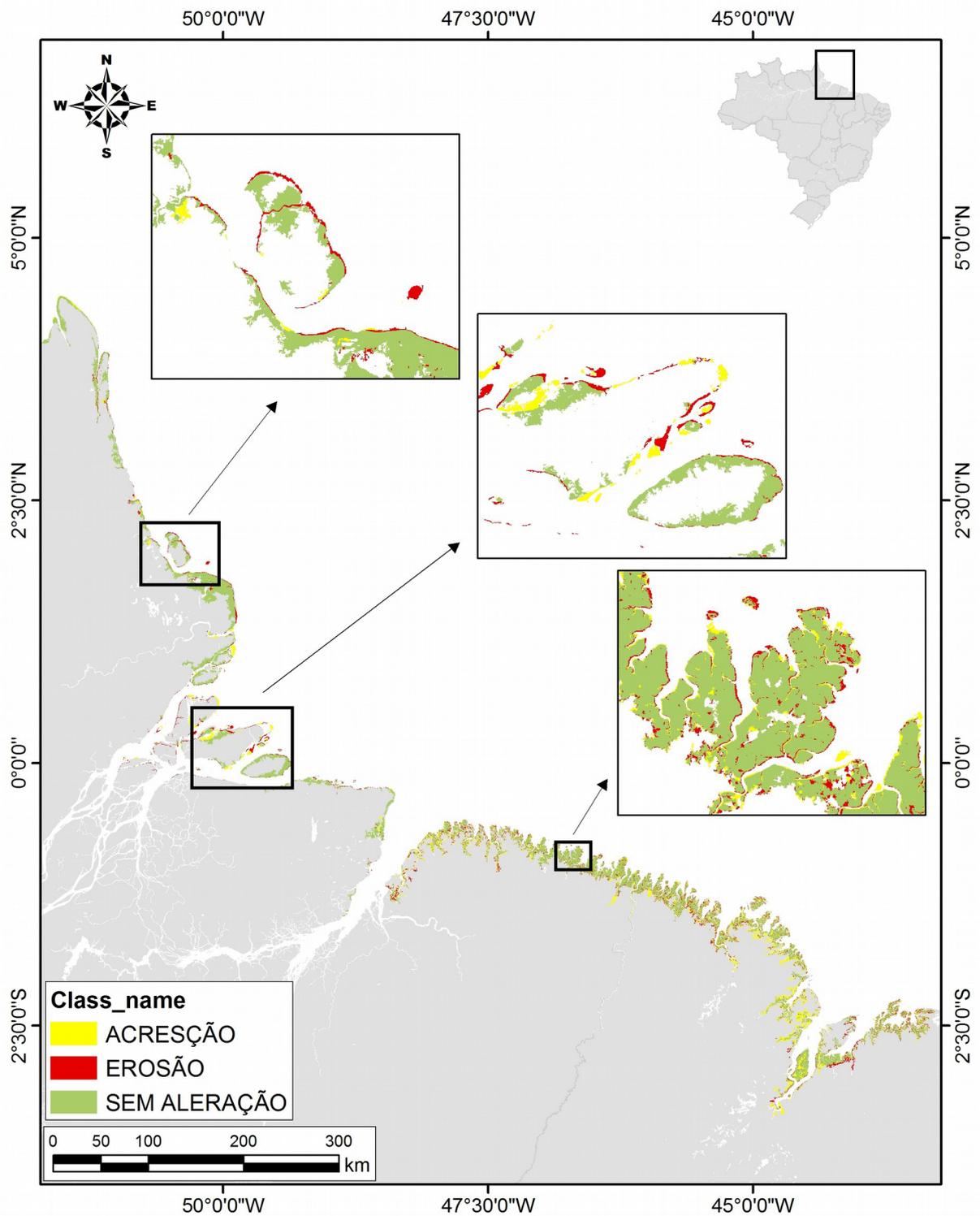


Figura 3.3: Detecção de mudanças nos manguezais da zona costeira amazônica entre as décadas de 1990 e 2000. Os retângulos destacam detalhes das mudanças na Ilha de Maracá (AP), Ilhas de Mexiana e Caviana (PA) e no município de Bragança (PA).

As regiões hidrográficas analisadas possuem características diferentes em relação a descarga líquida, estado de conservação do solo, população e atividades econômicas desenvolvidas.

Na Região Atlântico Nordeste Ocidental encontramos um litoral bastante recortado com uma população de mais de 2 milhões de habitantes da Baía de Marajó aos Lençóis Maranhenses e que apresenta um crescimento desordenado (Muehe, 2006). Na bacia Amazônica, a população residente na zona costeira chega a mais de 400 mil habitantes conforme o MMA (2008).

A tabela 3.9 apresenta os resultados da detecção de mudanças nos manguezais da Costa Norte brasileira.

Tabela 3.9: Quantificação das mudanças nas áreas de manguezais entre as décadas de 1970/1990 e 1990/2000 na Costa Norte e nas regiões hidrográficas Amazônia e Atlântico Nordeste Ocidental.

| PERÍODO | SEM ALTERAÇÃO (km²) | ACRESCIMENTO (km²) | EROSÃO (km²) |
|---|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Costa Norte (1970 a 1990) | 7.702 | 3.140 | 2.952 |
| Costa Norte (1990 a 2000) | 9.113 | 2.348 | 1.729 |
| R. H. Amazônia (1970 a 1990) | 3.666 | 473 | 627 |
| R. H. Amazônia (1990 a 2000) | 3.643 | 395 | 495 |
| R. H. Atlântico NE Ocidental (1970 a 1990) | 4.036 | 2.667 | 2.325 |
| R. H. Atlântico NE Ocidental (1990 a 2000) | 5.469 | 1.953 | 1.234 |

De 1970 a 1990 a área de manguezal que permaneceu sem alteração corresponde a 56%. As áreas aonde ocorreram novas expansões dos manguezais correspondem nesse período a 23% e as áreas aonde ocorreram redução do ecossistema possui percentual de 21%. Em um período de 20 anos houve crescimento de área de mangue de 3140 km² e redução de 2952 km².

As tabelas de 3.10 a 3.12 representam as matrizes de confusão obtidas durante a validação da classificação dos manguezais para as décadas de 2000, 1990 e 1970. Foram coletadas mais de 300 pontos para cada classe (Manguezais e Outros) sobre as imagens

LANDSAT utilizadas na classificação. No geral, a exatidão da classificação atingiu mais de 90% e índices kappa acima de 0,8.

Tabela 3.10: Matriz de confusão produzida para validação da classificação dos manguezais na década de 2000.

| Classificação | Manguezal | Outros | Total | Erro Comissão | Exatidão do Usuário |
|--------------------------------|-----------|----------------------------|-------|---------------|---------------------|
| Manguezal | 329 | 46 | 375 | 12,26% | 87,73% |
| Outros | 6 | 315 | 321 | 1,86% | 98,13% |
| Total | 335 | 361 | 696 | | |
| Erro Omissão | 1,79% | 12,74% | | | |
| Exatidão do Produtor | 98,20% | 87,25% | | | |
| Kappa por Classe | 0,9251 | 0,9251 | | | |
| Exatidão Geral = 92,52% | | Índice Kappa = 0,85 | | | |

Tabela 3.11: Matriz de confusão produzida para validação da classificação dos manguezais na década de 1990.

| Classificação | Manguezal | Outros | Total | Erro Comissão | Exatidão do Usuário |
|--------------------------------|-----------|----------------------------|-------|---------------|---------------------|
| Manguezal | 318 | 47 | 365 | 12,87% | 87,12% |
| Outros | 3 | 341 | 344 | 0,87% | 99,12% |
| Total | 321 | 388 | 709 | | |
| Erro Omissão | 0,93% | 12,11% | | | |
| Exatidão do Produtor | 99,06% | 87,88% | | | |
| Kappa por Classe | 0,9293 | 0,9293 | | | |
| Exatidão Geral = 92,95% | | Índice Kappa = 0,85 | | | |

Tabela 3.12: Matriz de confusão produzida para validação da classificação dos manguezais na década de 1970.

| Classificação | Manguezal | Outros | Total | Erro Comissão | Exatidão do Usuário |
|--------------------------------|-----------|----------------------------|-------|---------------|---------------------|
| Manguezal | 311 | 40 | 351 | 11,39% | 88,60% |
| Outros | 22 | 321 | 343 | 6,41% | 93,58% |
| Total | 333 | 361 | 694 | | |
| Erro Omissão | 6,6% | 11,08% | | | |
| Exatidão do Produtor | 93,39% | 88,91% | | | |
| Kappa por Classe | 0,9105 | 0,9105 | | | |
| Exatidão Geral = 91,06% | | Índice Kappa = 0,82 | | | |

Para classificar os manguezais da década de 2000, foram selecionados 696 pontos sendo 375 para a classe *Manguezal* e 321 para a classe *Outros*. Dos 375 pontos, 329 foram coerentes com o manguezal classificado na década de 2000 representando uma exatidão de 87,73%. Entre as outras classes que poderiam gerar confusão na classificação dos manguezais apenas 6 amostras confundiram com mangue do total de 321.

A tabela 3.11 mostra o resultado da classificação dos manguezais para a década de 1990. Foram selecionados 709 pontos, 365 para a classe *manguezal* e 344 para a classe *outros*. Os pontos que foram coerentes com a classificação do manguezal representaram 87,12% (318). Para a classe *Outros* foram selecionados 344 pontos sendo que apenas 3 foram classificados como mangue.

A tabela 3.12 é o resultado da classificação dos manguezais para a década de 1970. Foram coletados 694 pontos para a classificação sendo 351 para a classe *Manguezal* e 243 para a classe *Outros*. Dos 351 pontos, 311 foram classificados corretamente como manguezal havendo confusão em 40 pontos com a classe *Outros*. A exatidão geral para a classe *Manguezal* foi de 88,6%, enquanto houve uma redução na exatidão da classe *Outros* (93,58%), pois dos 343 pontos 22 confundiram com a classificação do manguezal. Dentre as classificações tivemos maior dificuldade em classificar os manguezais na década de 1970 devido à baixa qualidade radiométrica e resolução espacial do sensor MSS em relação ao sensor TM .

3.4- DISCUSSÃO.

3.4.1- A dinâmica dos manguezais na zona costeira amazônica.

Na Costa Norte o processo de expansão dos manguezais possui particularidades que envolvem fatores naturais e sociais. A área possui uma extensão de aproximadamente 1300 km percorrendo a linha de costa. Verificou-se que a expansão dos manguezais na Costa Norte está ocorrendo ao longo de 4 décadas, porém esse processo não ocorre de forma linear em toda a extensão da área. Analisou-se os resultados separando em duas regiões hidrográficas definidas pela Agência Nacional de Águas do Brasil devido a grande extensão e objetivando analisar a dinâmica dos manguezais a margem esquerda e direita do rio Amazonas. Deve-se ressaltar que as duas regiões hidrográficas possuem características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas diferentes. Contudo, essas variáveis associadas a processos continentais contribuirão diferenciadamente para a dinâmica do ecossistema manguezal.

Na figura 3.4 verifica-se a dinâmica dos manguezais. Na costa do Amapá (Foz do rio Araguari e ilhas de Maracá e Jipioca) identificando a acreção e erosão nas áreas colonizadas pelo mangue nas margens dos rios ou linha de costa (manguezais de franja). Esses manguezais podem estar sofrendo influência das correntes marinhas e fluxo de descarga do rio Amazonas que seguem ao longo do litoral de Sul para Norte. Nessa região pode ocorrer a formação de bancos arenosos e lamosos vegetados ou não. Essas ilhas podem aparecer e desaparecer constantemente em função da interação das correntes de maré e fluviais (Silveira et al., 2002)

Na Costa Nordeste do Pará e Baía de São Marcos (Maranhão) identifica-se a erosão na linha de costa e áreas no interior do continente que geralmente são atingidas pela maré alta. As áreas de acreção de área de manguezal no contato interno entre planície e planalto costeiro.

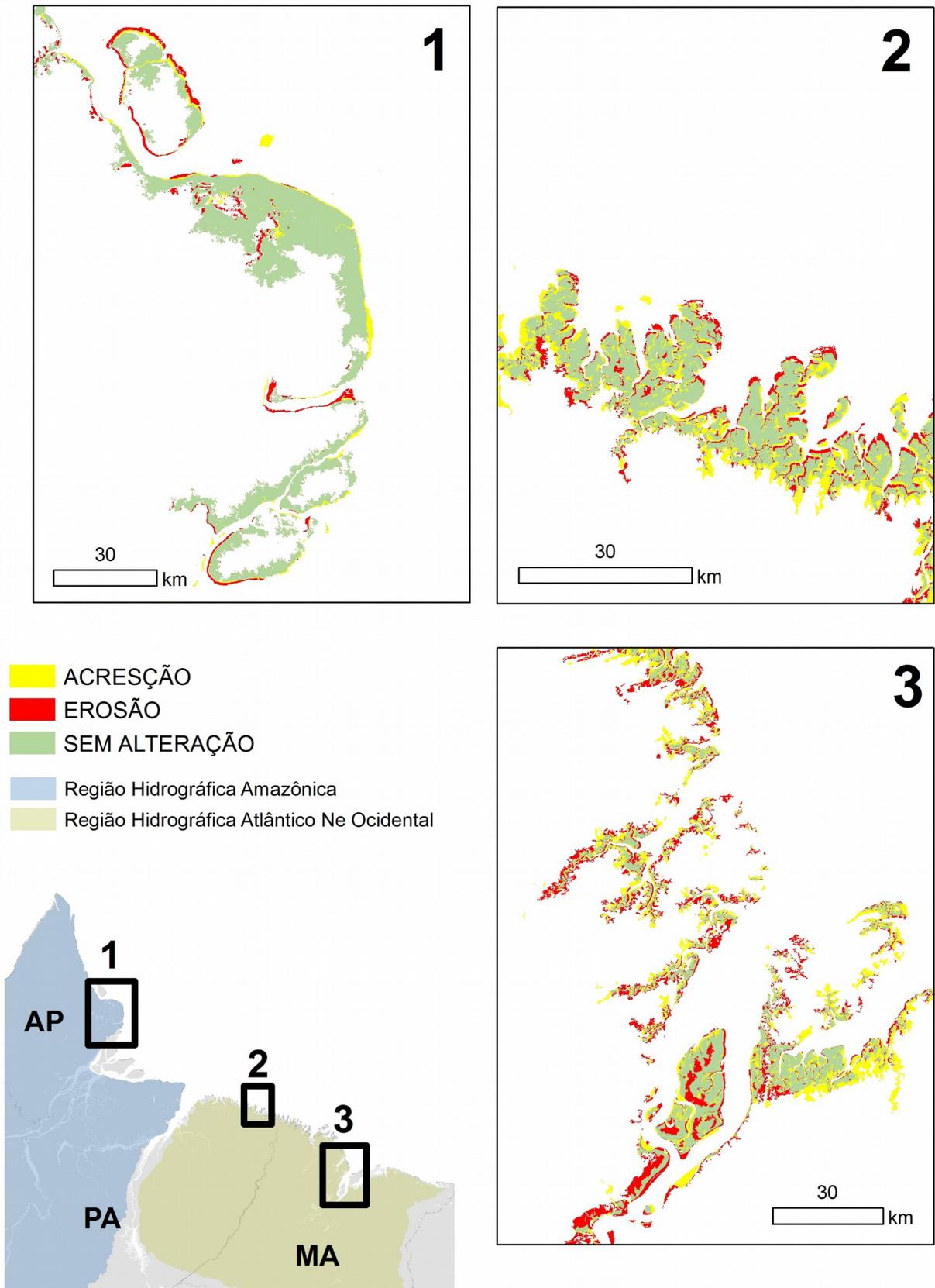


Figura 3.4: Mudanças ocorridas entre as décadas de 1970 e 1990 destacando três áreas da zona costeira amazônica (Foz do Araguari - Amapá, litoral Nordeste do Pará e Baía de São Marcos - Maranhão).

Na figura 3.5 destacamos as mesmas áreas para análise. O comportamento é semelhante ao identificado na figura 3.4, ou seja, erosão na linha de costa e tendência a colonização em direção ao interior dos rios e contato da planície com o planalto costeiro. Esse comportamento dos manguezais na Costa Norte do Brasil representa um efeito em relação as mudanças climáticas (Godoy & Lacerda, 2015).

Num cenário de mudanças climáticas, onde podemos destacar a elevação do nível do mar e aumento da temperatura, isso representa condição favorável para a expansão das florestas de mangue que respondem a essas mudanças através da migração para o interior (em direção ao continente) em detrimento de outras espécies de plantas que não conseguem se adaptar a novas condições de correntes, ondas e salinidade (Field, 1995; Alongi, 2008).

Alongi (2008) diz que no passado geológico os manguezais conseguiram sobreviver à mudança do nível do mar de até 120 metros. Isso vai depender das características locais e taxas de sedimentação. A fonte de sedimentos é de grande importância para a vegetação de mangue, pois as novas áreas de sedimentação servem de suporte para a expansão da cobertura vegetal. Portanto o equilíbrio entre erosão e sedimentação costeira é importante para a colonização dos manguezais (Godoy & Lacerda, 2015).

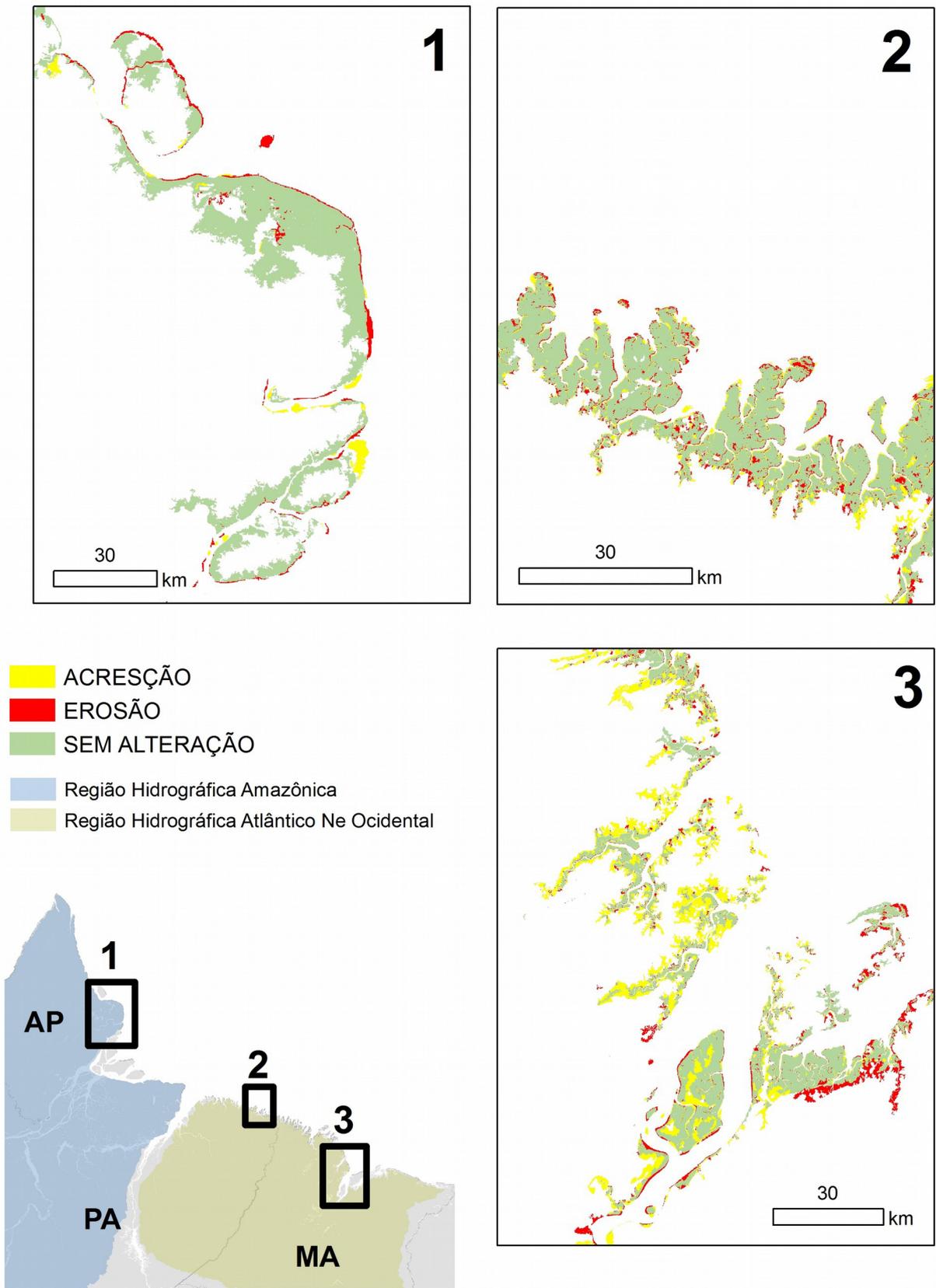


Figura 3.5: Mudanças ocorridas entre as décadas de 1990 e 2000 destacando três áreas da zona costeira amazônica (Foz do Araguari - Amapá, litoral Nordeste do Pará e Baía de São Marcos - Maranhão).

Dentre os impactos provocados pela ação do homem, foi possível verificar que de 1975 a 2008 a redução das áreas de manguezal foi de 10,58 km². O desmatamento provocado pelo homem nas áreas de mangue corresponde a 0,09% do total da área. Estes impactos foram reconhecidos de forma direta (observação no lugar) e posterior identificação dos polígonos mapeados. São representados pelas construções de cidades, vilas e rodovias que cortam a floresta de mangue (figura 3.6).

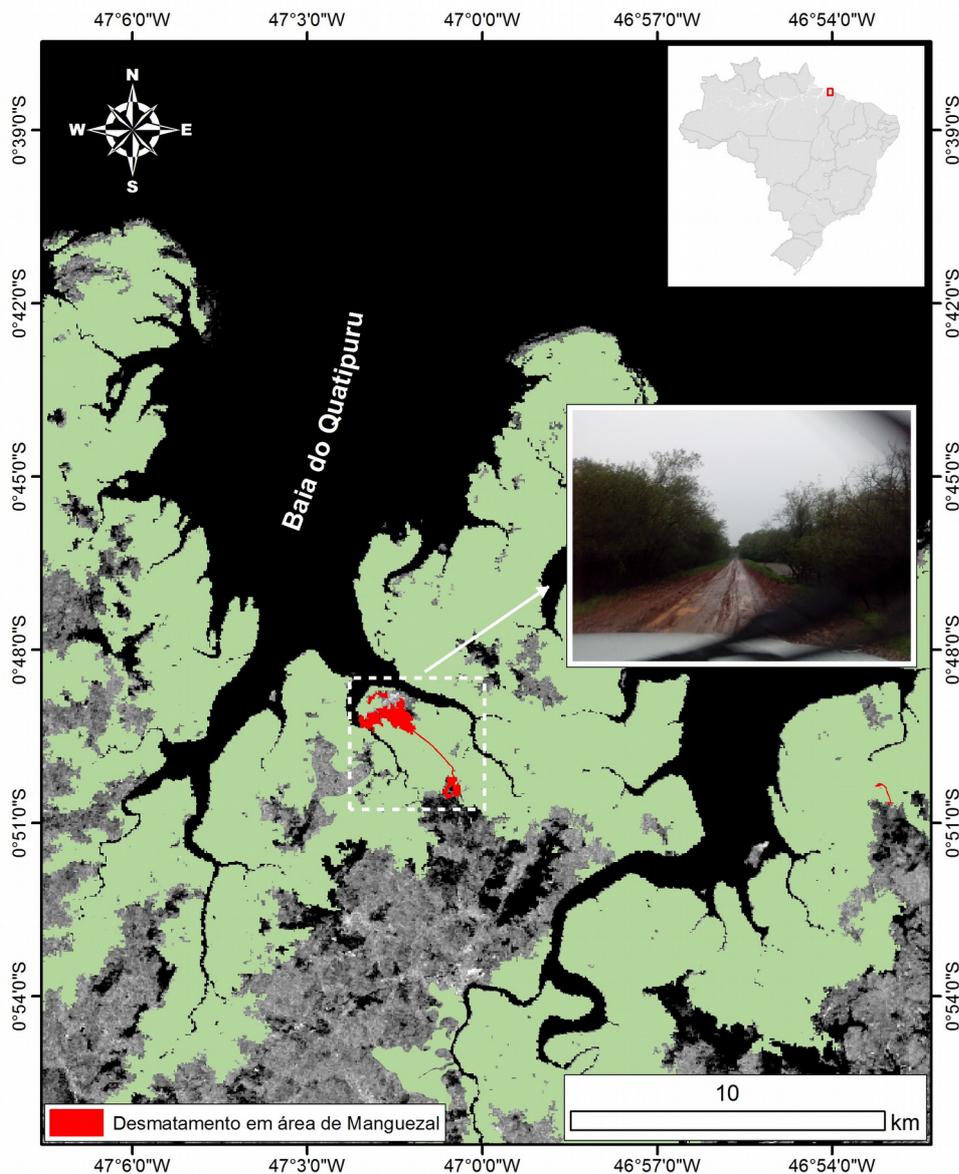


Figura 3.6: Desmatamento em áreas de manguezais por ação antrópica localizado no município de Tracuateua- PA. A área desmatada representa a abertura de rodovias não pavimentadas sobre floresta de mangue.

Esse baixo impacto antrópico sobre os manguezais podem ser compreendidos devido as grandes distâncias e dificuldades de acesso à floresta de mangue, pois estas possuem poucas estradas de acesso, e a existência de áreas de preservação como as Reservas Extrativistas do Litoral do Pará (Menezes et al., 2008).

Ao que tudo indica os manguezais amazônicos estão sob forte influência de processos naturais (macromarés, correntes marinhas e descarga sólida em suspensão dos rios amazônicos).

Na figura 3.7 pode-se observar a acresção e redução dos manguezais entre as décadas de 1990 e 2000. A área mapeada representa a foz do rio Amazonas aonde estão localizadas as ilhas de Janaucu, Caviana e Mexiana. Nessa região, a dinâmica dos manguezais está associada a descarga do rio Amazonas e variação das marés. Percebemos as maiores alterações nas margens das ilhas identificando a erosão e acresção nas margens e colapso e surgimentos de pequenas ilhas.

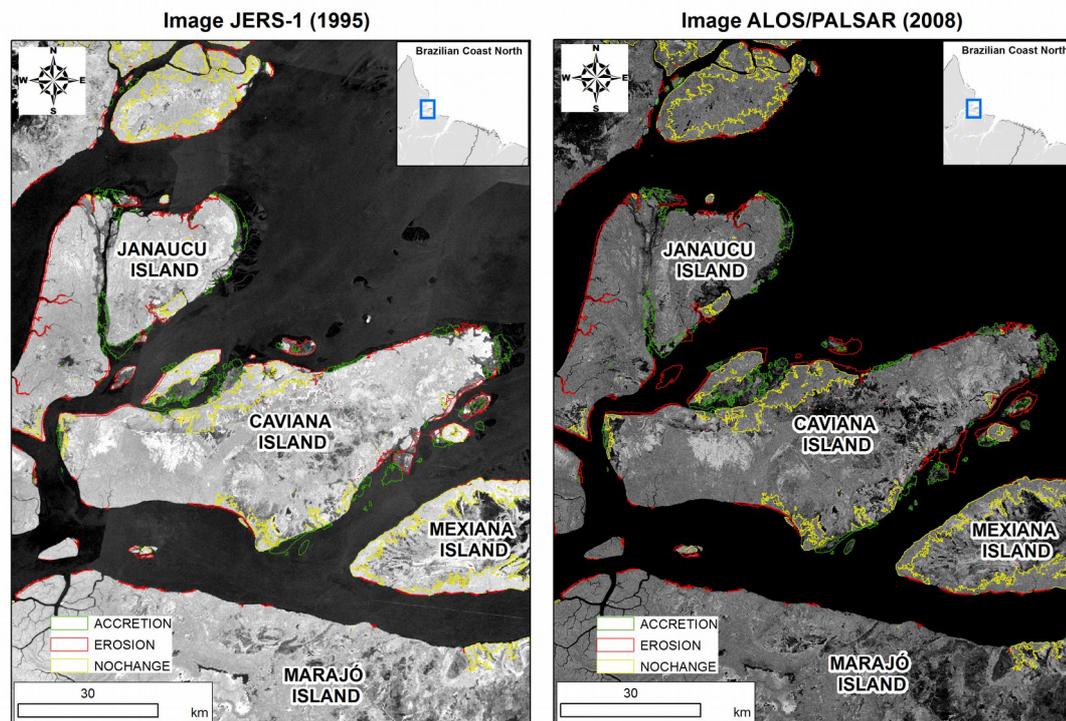


Figura 3.7: Detecção de mudanças entre as décadas de 1990 e 2000. Dinâmica nas margens das ilhas de Mexiana, Caviana e Janaucu localizadas na foz do rio Amazonas.

Os manguezais da zona costeira amazônica não sofreram impactos significativos se analisarmos o uso das áreas de manguezal em relação ao Nordeste e Sul do Brasil e outros países que impactam diretamente sobre este ecossistema.

3.4.2- A dinâmica dos manguezais no mundo.

Godoy & Lacerda (2015) realizaram uma avaliação da literatura sobre manguezais respondendo as mudanças climáticas publicada nos últimos 25 anos. Embora muitos estudos mostrem a redução dos manguezais devido a pressão antrópica, vários trabalhos comprovaram a expansão dos manguezais em resposta a mudança climática global. Os manguezais estão expandindo seus limites latitudinais devido aos invernos mais quentes, que diminuem as temperaturas mais frias, e nos estuários em baixas latitudes estão migrando em direção ao continente devido à subida do nível do mar.

Em várias regiões do planeta, os manguezais estão sendo impactados por práticas humanas. De acordo com (Giri et al., 2014), os manguezais no sul da Ásia (Bangladesh, Índia, Paquistão e Sri Lanka) foram mapeados de 2000 a 2012 sendo detectado uma perda líquida de 11.673 ha. Esta área mapeada corresponde a 7% do total dos manguezais do mundo. Dentre as causas da redução de área podemos citar a conversão para outros usos da terra, sobre exploração, poluição, indisponibilidade de água doce, inundações, redução da disposição de sedimentos, erosão costeira e perturbações por ciclones e tsunames.

No Vietnã (península de Ca Mau), as florestas de mangue sofreram redução de 74% em área de 1979 a 2013 (34 anos) devido ao crescimento da indústria da aquicultura. Contudo, medidas de reflorestamento tem sido realizadas promovendo o aumento das áreas de manguezal em 13% (Son et al., 2014).

Em outras regiões da Ásia e oceano Índico há indicativos de redução dos manguezais por influência antrópica associado com a expansão da atividade de carcinicultura, urbanização e desmatamento para obtenção de lenha (Ibharim et al., 2015; Jeanson et al., 2014; Long et al., 2014; Vo et al., 2013).

Na América do Sul, também encontramos trabalhos referentes ao impacto humano sobre os manguezais. Conforme (Mialhe, Gunnell, & Mering, 2013), a carcinicultura surgiu no Peru no final da década de 70. Os manguezais no delta do rio Tumbes tiveram uma redução de 17% em decorrência da atividade de carcinicultura. No Brasil (Queiroz et al., 2013) também chamam a atenção para a implementação desta atividade no litoral do Ceará, região nordeste, desde a década de 70 e vem gerando impactos diretos sobre os manguezais e apicuns.

No continente africano, manguezais do oeste sofreram redução de área em 24 anos. Essa redução é impulsionada em grande parte pela extração de lenha para abastecer os

grandes centros urbanos (Carney et al., 2014). Os manguezais do Quênia foram mapeados utilizando imagens de satélite Landsat de 1985, 1992, 2000 e 2010 e apresentaram uma redução de 18% que está possivelmente relacionado com a extração de lenha, madeira e autorização para uso da terra convertendo áreas de mangue em salinas e viveiros e o uso dos espaços costeiros para atividade turística (Kirui et al., 2011).

3.5- CONCLUSÕES.

Os manguezais da zona costeira amazônica vem expandindo em área de uma forma geral. Contudo, se analisarmos a extensão dos manguezais de acordo com cada região hidrográfica, delimitada pela ANA, perceberemos que as florestas de manguezal na região hidrográfica Amazônia tiveram uma redução em área de 254 km² e a região hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental apresentou um ganho de 807 km² ao longo de 33 anos (1975 a 2008). Essa acresção na região Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão é bastante representativa e podem estar recebendo influência de processos naturais (oscilações do nível do mar, mudanças nas correntes marinhas, sedimentação marinha, etc) e de processos antrópicos (uso e ocupação do solo na zona costeira amazônica). Apesar dos manguezais da foz do rio Amazonas e costa do Amapá receberem influência direta dos sedimentos e nutrientes do rio com maior vazão e carga sedimentar do mundo, as forçantes marinhas podem estar interagindo com as águas do rio Amazonas resultando no deslocamento dos sedimentos finos (silte e argila) para outras áreas costeiras dificultando a floculação e consequente deposição desse sedimentos na costa do Amapá.

Compreender essa dinâmica é importante, pois os fatores naturais possuem magnitude superior aos fatores antrópicos e na região onde encontramos a costa mais preservada (litoral do Amapá) observamos a redução de áreas de manguezal e na região antropizada (nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão) identificamos a expansão das áreas do ecossistema. Surgem novos questionamentos diante dos resultados. Dentre eles perguntamos se a forma de uso do solo nas sub-bacias costeiras do Pará e Maranhão teriam alguma relação de causalidade com a expansão dos manguezais na zona costeira nordeste do Pará e Maranhão. Para investigar essa questão poderemos começar analisando a relação entre a descarga sólida em suspensão nos rios amazônicos. Posteriormente analisar o comportamento da descarga líquida e a relação da concentração de sedimentos em suspensão com o uso do solo nas sub-bacias hidrográficas costeiras.

CAPÍTULO 4: O PAPEL DAS VARIAÇÕES DE DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO DE RIOS AMAZÔNICOS NA DINÂMICA NAS ÁREAS DE MANGUEZAIS NA ZONA COSTEIRA ADJACENTE.

4.1- INTRODUÇÃO.

Os manguezais são ecossistemas costeiros presentes nas faixas tropical e subtropical do planeta, ocupando regiões tipicamente inundadas pelas marés (estuários, lagoas costeiras, baías e deltas). Geralmente são regiões aonde observamos a subida e descida da maré e a mistura de águas do rio e do mar (Herz, 1987). A zona costeira está sujeita a contínuas alterações morfodinâmicas modeladas por processos de origem continental e marinha (Silva et al., 2004).

Dentre os principais agentes que modelam os ambientes costeiros podemos citar os movimentos tectônicos ao longo das margens continentais, oscilações do nível do mar associada à ação de ondas, marés correntes e também à ação fluvial e eólica (Silva et al., 2004). Os manguezais estão sujeitos à interferência desses agentes e sua presença ou não nas zonas costeiras resultam da combinação deles e de fatores controlados pelo clima (e.g. temperatura do ar, temperatura do mar, precipitações).

Para compreender a dinâmica dos manguezais de forma global temos que observar esses agentes modeladores resultantes de processos geológicos continentais, marinhos e processos meteorológicos produzindo paisagens muito dinâmicas na escala de tempo geológica (Silva et al., 2004; Press et al., 2006). A análise integrada desses processos é bastante complexa e muitas vezes limitada pela ausência de dados e dificuldade de coleta. Dentre os processos podemos destacar a precipitação como um agente modelador dos continentes.

A precipitação é importante na regulação das condições ecológicas e geográficas de uma determinada região. A quantidade de precipitação e intensidade afetam a natureza e magnitude do trabalho geomorfológico em bacias de drenagem (Netto, 2005).

O total pluviométrico possui uma relação direta com o volume de água ou vazão que escoar pelo canal de drenagem (Guerra, 2005). O transporte de sedimentos ao longo de um rio vai depender da vazão e volume associada com o fluxo das correntes no canal de drenagem (Cunha, 2005).

A rede de drenagem ou bacia hidrográfica é uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, num determinado ponto de

um canal fluvial. O limite de uma bacia de drenagem é conhecido como divisor de drenagem ou de águas (Cunha, 2005; Botelho & Silva, 2004).

As bacias hidrográficas costeiras são de grande interesse nesse estudo, pois ao longo do curso fluvial encontramos os mangues no curso inferior, local onde ocorre o encontro de águas dos mar com as do rio. É nesse trecho do curso do rio que o processo deposicional ocorre com maior intensidade, ou seja, os sedimentos que foram removidos dos solos pela ação das chuvas e transportados pelos rios até a desembocadura são depositados formando extensos depósitos sedimentares onde os mangues podem se fixar.

O transporte de sedimento pela ação de um recurso hídrico é um processo natural e o principal elemento que modela as paisagens. Esse processo pode ser acelerado pela ação antrópica desordenada, principalmente junto às margens dos rios. As alterações mais representativas são a retirada de vegetação, o manejo inadequado do solo e a urbanização (Scapin, 2005).

O desmatamento, agricultura, pecuária e mineração são atividades que influenciam no processo de remoção de sedimentos e transporte pelos rios, pois solos expostos são mais vulneráveis a ação da erosão provocada pela chuva e do escoamento superficial em direção aos canais fluviais.

Ao somar a descarga de todos os rios do planeta, o transporte de sedimentos pode chegar a 16 bilhões de toneladas anuais de sedimentos clásticos e 2 a 4 bilhões de toneladas anuais de material dissolvido. Grande parcela desta carga é associada a ação antrópica sobre os recursos naturais. Antes do surgimento do homem, a descarga de sedimentos variava em torno de 9 bilhões de toneladas conforme Press et al. (2006).

O espaço costeiro amazônico é submetido à diversas pressões antrópicas devido à exploração e ocupação humana (Menezes et al., 2008). As áreas costeiras são atraentes para o progresso humano levando em consideração o aumento da população e o desenvolvimento da infraestrutura regional (Szlafsztein, 2005).

O homem, como um agente que transforma o espaço através do trabalho, exerce influência nos espaços em que ele está inserido. Se utilizarmos a bacia hidrográfica como unidade de análise, podemos verificar a atuação do homem através do trabalho interagindo com processos naturais e promovendo mudanças.

Compreendendo os processos de precipitação e drenagem, pode-se analisar a relação entre as variações fluviométricas nas bacias hidrográficas costeiras e o transporte de sedimentos para os ambientes de sedimentação onde encontramos os manguezais. Sabendo

que existe uma relação entre a precipitação e a erosão dos solos, pode-se refletir sobre a variação fluviométrica na região influenciando na erosão dos solos e transporte de sedimentos e nutrientes para os estuários contribuindo para um possível aumento das áreas de manguezal.

Em conjunto com os processos meteorológicos (precipitações) destacamos as transformações proporcionadas pelo homem ao meio (desmatamento, agricultura, urbanização, etc). Os impactos diretos sobre a cobertura florestal podem estar influenciando juntamente com as variações fluviométricas para uma maior deposição de sedimentos e nutrientes nos estuários favorecendo a expansão dos manguezais.

Dessa forma, o objetivo neste capítulo é analisar a relação das variações da descarga sólida em suspensão (obtida através de dados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão) dos rios Araguari (Amapá), Gurupi (Pará/Maranhão) Pindaré, Grajaú e Mearim (Maranhão) com a dinâmica dos manguezais na foz destes rios. Dessa forma, será possível avaliar o papel dos processos hidrossedimentares ocorrentes na bacia de drenagem na dinâmica dos manguezais na zona costeira adjacente.

4.2- MATERIAIS E MÉTODOS.

Para avaliar o papel da descarga sólida em suspensão na dinâmica das áreas de manguezais foi necessário obter a delimitação das sub-bacias hidrográficas. Posteriormente, estimou-se a descarga sólida em suspensão (Qss) a partir dos dados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão (Css) (1). Delimitou-se áreas nos estuários dos rios para extração das áreas de manguezais mapeadas nas décadas de 1970, 1990, 2000 e detecção de mudanças entre 1970/1990 e 1990/2000 (2). Dessa forma, obteve-se a análise das variações de Qss e a dinâmica dos manguezais nos estuários dos rio Araguari (3), Gurupi (4) e Mearim (5). A figura 4.1 sintetiza os passos realizados no capítulo 4.

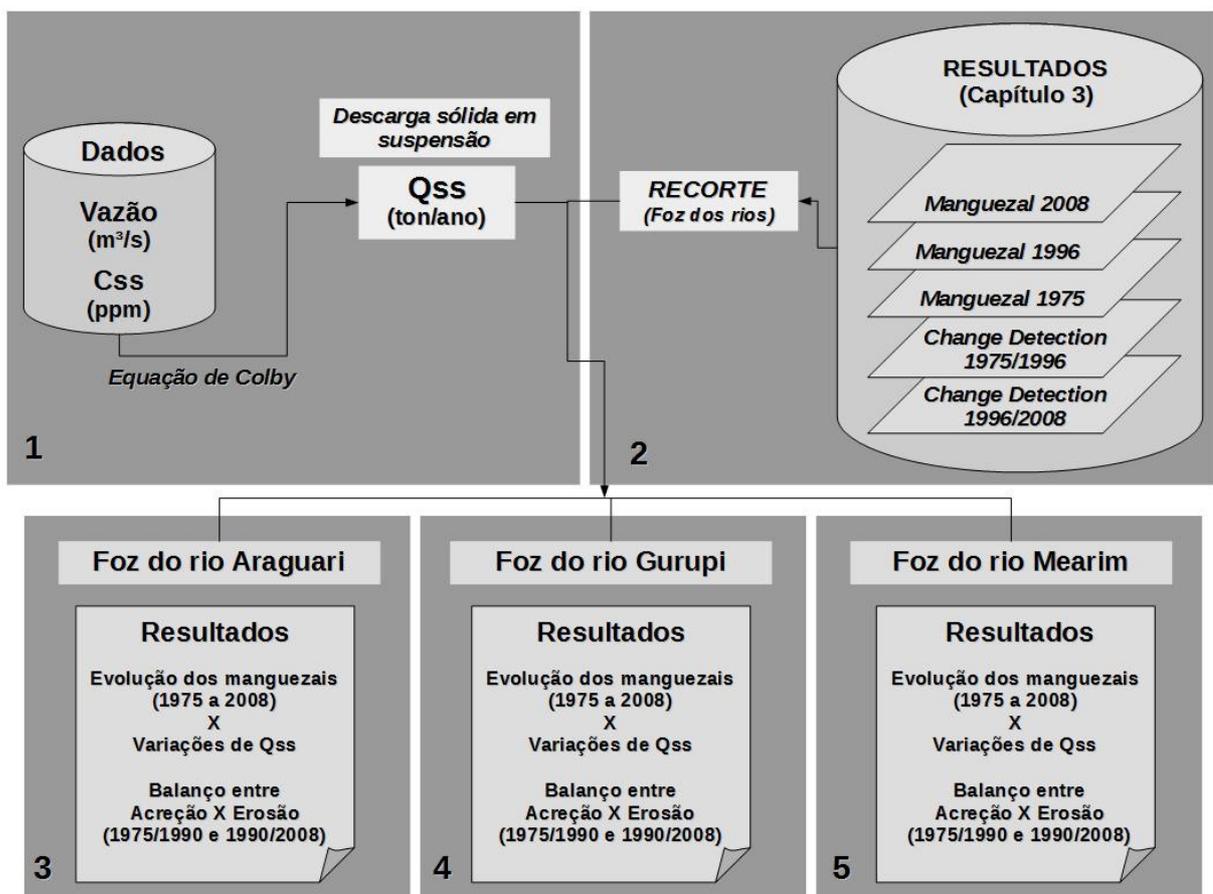


Figura 4.1: Fluxograma representando as etapas realizadas no capítulo 4.

4.2.1- Delimitação das sub-bacias hidrográficas.

A primeira tarefa a ser realizada foi a delimitação das bacias hidrográficas dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Pindaré.

A delimitação das sub-bacias hidrográficas foi realizada com base nos arquivos vetoriais de drenagem em escala 1:250.000 da Agência Nacional de Águas (ANA). Através da extração automática de drenagem no software global mapper, identificamos os divisores de águas das sub-bacias utilizando o Modelo Digital de Elevação Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

A importância de se obter a delimitação das sub-bacias foi devido não encontrarmos arquivos vetoriais compatíveis com a rede de drenagem em escala 1:250.000 da Agência Nacional de Águas.

Tabela 4.1: Sub-bacias delimitadas a partir de extração automática de drenagem no software Global Mapper. Abaixo segue a área de cada sub-bacia e os Estados as quais estão localizadas.

| Sub-bacia | Estado | Área Drenada (km²) |
|------------------|---------------|--------------------------------------|
| Araguari | Amapá | 37.873 |
| Gurupi | Pará/Maranhão | 34.551 |
| Pindaré | Maranhão | 40.020 |
| Grajaú | Maranhão | 23.618 |
| Mearim | Maranhão | 34.961 |

4.2.2- Dados de estações fluviométricas e de sedimentos.

Após a delimitação das sub-bacias, foi realizado o download de séries históricas de vazão e concentração de sedimentos em suspensão no portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (<http://hidroweb.ana.gov.br/>). Foram selecionados dados de 5 estações: Porto Platon – AP; Alto Bonito – PA; Pindaré-Mirim – MA; Aratoi Grande – MA; Pedreiras II – MA (Tabela 4.2). O critério de seleção dessas estações foi a proximidade do curso inferior ou estuário do rio e possuem maior série temporal. A localização das estações Fluviométricas/sedimentológicas em cada bacia hidrográfica e observada na figura 2.1.

Tabela 4.2: Estações de coleta de dados da Agência Nacional de Águas identificando o nome, a natureza, ano de operação e localização da estação.

| ESTAÇÃO | ANO DE INÍCIO DA OPERAÇÃO | NATUREZA | SUB-BACIA HIDROGRÁFICA | MUNICÍPIO |
|---------------|---------------------------|---------------|------------------------|--------------------|
| POTO PLATON | 1952 | FLUVIOMÉTRICA | ARAGUARI | PORTO GRANDE |
| PORTO PLATON | 1977 | SEDIMENTOS | ARAGUARI | PORTO GRANDE |
| ALTO BONITO | 1974 | FLUVIOMÉTRICA | GURUPI | CACHOEIRA DO PIRIÁ |
| ALTO BONITO | 1995 | SEDIMENTOS | GURUPI | CACHOEIRA DO PIRIÁ |
| PINDARÉ-MIRIM | 1971 | FLUVIOMÉTRICA | PINDARÉ | PINDARÉ-MIRIM |
| PINDARÉ-MIRIM | 1992 | SEDIMENTOS | PINDARÉ | PINDARÉ-MIRIM |
| ARATOI GRANDE | 1970 | FLUVIOMÉTRICA | GRAJAÚ | BELA VISTA DO MA. |
| ARATOI GRANDE | 1993 | SEDIMENTOS | GRAJAÚ | BELA VISTA DO MA. |
| PEDREIRAS II | 1977 | FLUVIOMÉTRICA | MEARIM | PEDREIRAS |
| PEDREIRAS II | 1982 | SEDIMENTOS | MEARIM | PEDREIRAS |

Foram selecionados dados de vazão e sedimentos de 1977 a 2008. Foram gerados os valores médios anuais dos dados de vazão e sedimentos em suspensão. De acordo com os dados fornecidos pela ANA, apenas os dados de vazão estavam preenchidos com informações de vazões médias diárias desde 1977. Os dados de sedimentos em suspensão não apresentavam séries históricas completas para todas as sub-bacias analisadas desde 1977.

Os dados de vazão são médias mensais e os dados de sedimentos são medições trimestrais. Para este trabalho adotamos valores médios anuais para os dados de vazão e sedimentos em suspensão obtidos a partir do cálculo de média aritmética simples.

4.2.3- Estimativa da descarga sólida de sedimentos em suspensão utilizando a equação de Colby (1957).

Estimou-se o transporte de sedimentos em suspensão (descarga sólida) a partir de dados médios de vazão e concentração de sedimentos em suspensão das estações de medição da ANA. Para realizar o cálculo da descarga sólida em suspensão, utilizamos o método simplificado de Colby elaborado em 1957, representado pela equação abaixo:

$$Q_{ss} = 0,0864 * Q * C_{ss}$$

Onde:

- Q_{ss} representa a descarga s3lida em suspens3o medida em tonelada por dia (ton/dia);
- Q 3 a vaz3o m3dia em m³/s;
- C_{ss} 3 a concentra3o de sedimentos em suspens3o medida em ppm ou mg/l.
- **0,0864** representa o fator de convers3o de tonelada por dia.

O m3todo simplificado de Colby (1957) 3 uma forma indireta de se estimar a descarga s3lida, pois n3o 3 necess3rio a utiliza3o de qualquer equipamento para calibra3o ou medi3o direta. Colby estima de forma indireta a descarga s3lida de fundo e direta a descarga s3lida em suspens3o, fazendo-se uso da concentra3o de sedimentos suspensos para se obter a descarga.

4.2.4- Quantifica3o das 3reas de manguezais nos estu3rios dos rios araguari, gurupi e mearim.

No primeiro cap3tulo realizou-se a quantifica3o das 3reas de manguezais. Foram gerados arquivos vetoriais em formato shapefile para as d3cadas de 1970, 1990 e 2000. Com base no conhecimento em rela3o a dire3o das correntes de mar3 na zona costeira amaz3nica (Figura 4.2), realizamos um recorte da extens3o mapeada de manguezais ao longo dos estu3rios dos rios Araguari – AP, Gurupi – PA/MA e Mearim – MA (Baia de S3o Marcos).

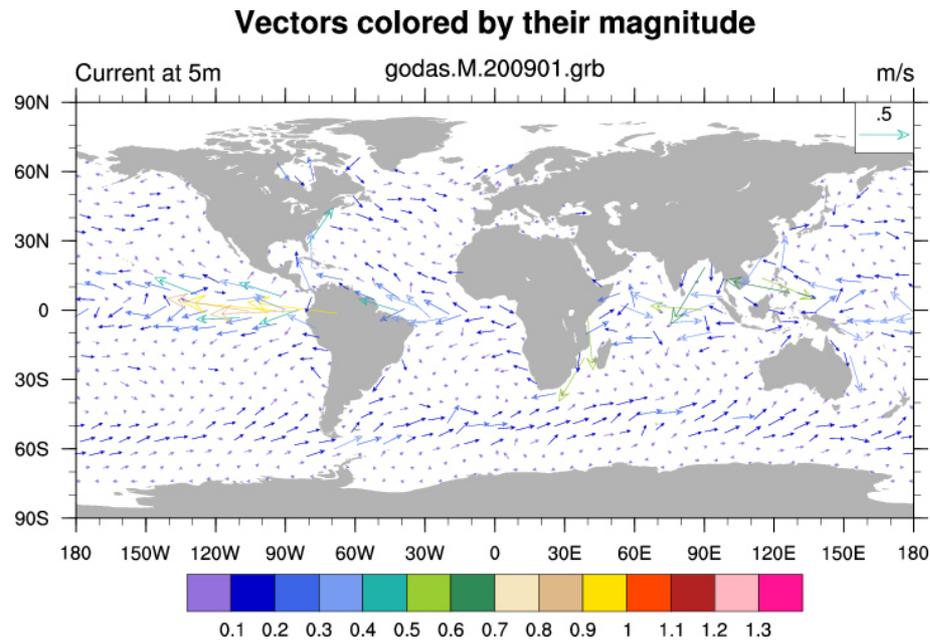


Figura 4.2: Figura identificando a circulação das correntes marinhas no planeta a 5 metros de profundidade da superfície do mar (Fonte: NCAR/UCAR (2016)).

Na zona costeira amazônica pode-se identificar que o deslocamento das correntes marinhas iniciando no oceano Atlântico Equatorial (Latitude 0° e Longitude 30°W) se deslocando ao longo da Costa Nordeste e Norte do Brasil indo para Noroeste. Esta corrente é conhecida como Corrente Costeira Norte Brasileira – CCNB (Johns et al., 1998; Silva et al., 2005).

A figura 4.3 destaca as áreas dos estuários onde foram quantificadas as áreas de manguezais nas décadas de 1970, 1990 e 2000.

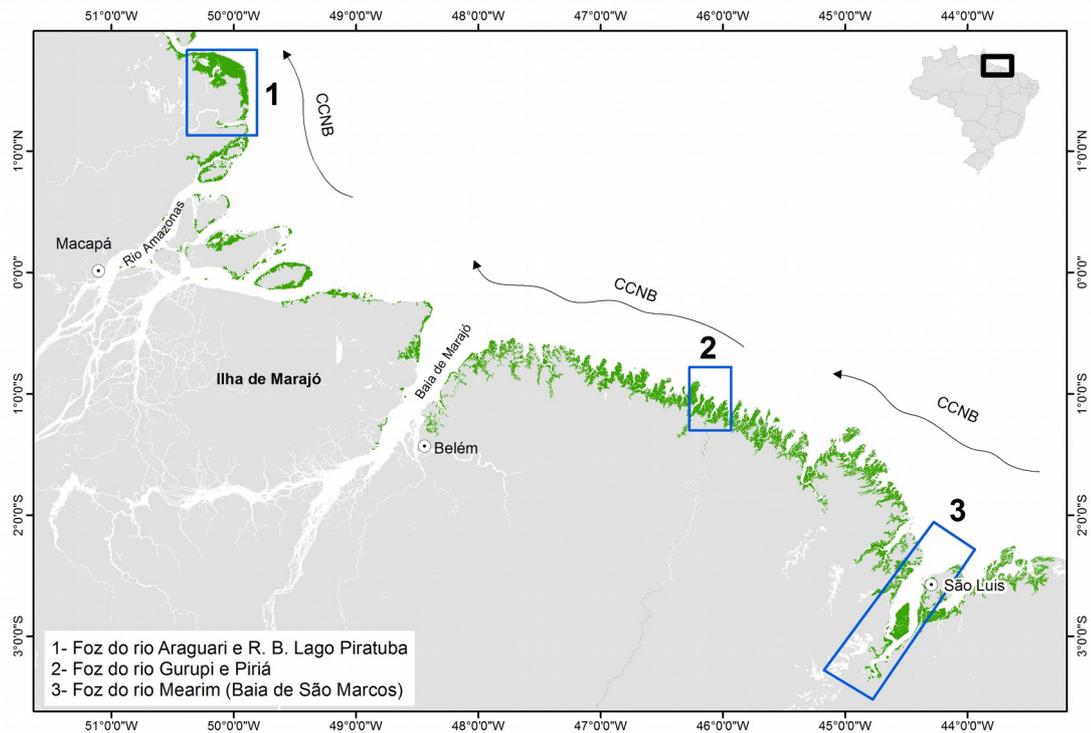


Figura 4.3: Identificação das áreas nos estuários do rios Araguari, Gurupi e Mearim onde foram quantificadas as áreas de mangue para análise relacional com os dados de descarga sólida em suspensão.

4.3- RESULTADOS.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos após análise dos dados de vazão, concentração de sedimentos em suspensão e geração da descarga sólida em suspensão, bem como a dinâmica das áreas de manguezais na foz dos rios analisados.

4.3.1- Médias anuais de vazão.

A tabela 4.3 apresenta os valores médios anuais de vazão nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim enquanto a figura 4.4 mostra o comportamento dos valores de vazão média para os rios analisados.

Tabela 4.3: Dados anuais médios de vazão obtidos a partir de dados diários nas estações fluviométricas de Porto Platon (AP), Alto Bonito (PA), Pindaré-Mirim (MA), Aratoi Grande (MA) e Pedreiras II (MA).

| ANO | ESTAÇÃO PORTO PLATON - ARAGUARI (m³/s) | ESTAÇÃO ALTO BONITO - GURUPI (m³/s) | ESTAÇÃO ARATOI- GRANDE - GRAJAU (m³/s) | ESTAÇÃO PEDREIRAS II - MEARIM (m³/s) | ESTAÇÃO PINDARÉ MIRIM - PINDARE (m³/s) |
|------------|--|---|--|--|--|
| 1977 | 943,92 | 490,51 | 136,31 | 120,32 | 179,08 |
| 1978 | 898,25 | 606,25 | 132,84 | 127,18 | 144,83 |
| 1979 | 995,26 | 341,26 | 83,72 | 96,67 | 91,83 |
| 1980 | 856,87 | 569,57 | 86,58 | 86,76 | 118,17 |
| 1981 | 588,84 | 244,50 | 42,90 | 68,12 | 46,17 |
| 1982 | 998,15 | 376,94 | 96,26 | 84,75 | 102,33 |
| 1983 | 391,58 | 114,37 | 23,43 | 53,61 | 27,17 |
| 1984 | 910,88 | 446,18 | 135,90 | 106,90 | 140,58 |
| 1985 | 992,39 | 646,35 | 258,91 | 186,38 | 235,67 |
| 1986 | 938,63 | 735,06 | 194,83 | 153,93 | 217,08 |
| 1987 | 779,70 | 378,68 | 55,44 | 71,93 | 106,33 |
| 1988 | 864,02 | 531,20 | 116,90 | 91,63 | 164,83 |
| 1989 | 1314,42 | 590,65 | 129,34 | 98,15 | 181,58 |
| 1990 | 1065,28 | 484,64 | 85,63 | 80,43 | 150,17 |
| 1991 | 1091,44 | 462,69 | 76,73 | 70,92 | 118,17 |
| 1992 | 646,98 | 233,54 | 67,84 | 69,81 | 94,75 |
| 1993 | 926,72 | 322,40 | 30,16 | 46,98 | 74,75 |
| 1994 | 1097,68 | 526,48 | 123,81 | 89,21 | 172,58 |
| 1995 | 1170,49 | 510,38 | 118,14 | 110,07 | 156,67 |
| 1996 | 1257,62 | 565,63 | 139,84 | 129,85 | 196,50 |
| 1997 | 746,74 | 373,01 | 99,59 | 80,28 | 105,08 |
| 1998 | 643,61 | 301,02 | 39,57 | 52,96 | 85,83 |
| 1999 | 907,83 | 516,40 | 92,41 | 75,77 | 152,50 |
| 2000 | 1223,33 | 552,43 | 131,05 | 128,93 | 208,08 |
| 2001 | 1040,11 | 570,37 | 95,91 | 82,56 | 128,33 |
| 2002 | 976,52 | 513,14 | 88,67 | 71,80 | 145,75 |
| 2003 | 908,79 | 505,69 | 77,45 | 72,72 | 141,92 |
| 2004 | 769,45 | 418,17 | 96,95 | 108,77 | 239,83 |
| 2005 | 771,79 | 412,08 | 58,48 | 73,88 | 122,33 |
| 2006 | 943,02 | 439,20 | 109,92 | 82,02 | 137,08 |
| 2007 | 883,52 | 386,31 | 90,87 | 59,21 | 129,58 |
| 2008 | 1153,12 | 573,81 | 124,40 | 109,81 | 90,31 |

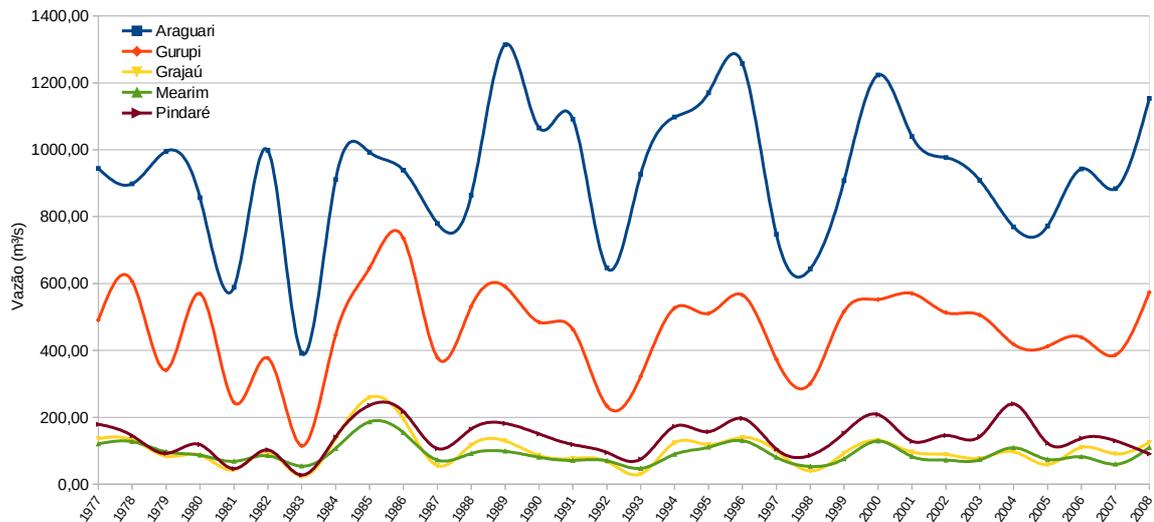


Figura 4.4: Variações dos dados anuais médios de vazão nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim.

Observando os dados médios de vazão, percebe-se que em média o fluxo de água que escoou pelo rio Araguari é superior aos demais chegando a ser 2 vezes a vazão do rio Gurupi, 6,7 vezes a do rio Pindaré, 9 vezes a do rio Grajaú e 10 vezes superior a vazão do rio Mearim. Os dados de vazão refletem a precipitação nas sub-bacias, ou seja, as chuvas são mais intensas sobre a sub-bacia do rio Araguari. A vazão inferior em comparação ao Araguari nos rios Grajaú e Mearim refletem menores precipitações devido estarem em área de transição entre os biomas amazônia e cerrado, ou seja, entre um clima úmido e seco.

Observando as curvas de vazão, identifica-se que apesar de volumes bastante diferentes existe um comportamento similar entre os resultados obtidos. Realizou-se testes de correlação entre os resultados obtidos. Identificamos uma correlação forte de 0,71 entre as vazões dos rios Araguari e Gurupi. Os rios Gurupi e Pindaré apresentaram uma correlação de 0,75 e os rios Grajaú e Mearim 0,93 (Tabela 4.4).

Tabela 4.4: Correlação entre as vazões médias dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim.

| Correlação | ARAGUARI | GURUPI | PINDARÉ | GRAJAÚ | MEARIM |
|------------|----------|--------|---------|--------|--------|
| ARAGUARI | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| GURUPI | 0,71 | ---- | ---- | ---- | ---- |
| PINDARÉ | 0,54 | 0,75 | ---- | ---- | ---- |
| GRAJAÚ | 0,52 | 0,78 | 0,78 | ---- | ---- |
| MEARIM | 0,46 | 0,71 | 0,75 | 0,93 | ---- |

De acordo com a correlação de Pearson, pode-se classificar os valores acima como: muito forte (entre 1 e 0,9 +/-), forte (entre 0,89 e 0,7 +/-), moderada (entre 0,69 e 0,5 +/-), fraca (entre 0,49 e 0,3 +/-) e mínima (entre 0,29 e 0 +/-). Fazendo uma avaliação geral, percebemos que existe uma relação forte positiva entre os dados. Isso pode indicar que a precipitação nas sub-bacias está sujeita a mesmos fenômenos de origem.

4.3.2- Médias Anuais de Concentração de Sedimentos em Suspensão (Css).

A tabela 4.5 apresenta os valores médios anuais de concentração de sedimentos em suspensão nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim.

Tabela 4.5: Dados anuais médios de concentração de sedimentos em suspensão (Css) obtidos a partir de dados diários nas estações fluviométricas de Porto Platon (AP), Alto Bonito (PA), Pindaré-Mirim (MA), Aratoí Grande (MA) e Pedreiras II (MA).

| ANO | ESTAÇÃO PORTO PLATON - ARAGUARI (ppm) | ESTAÇÃO ALTO BONITO - GURUPI (ppm) | ESTAÇÃO ARATOI- GRANDE - GRAJAU (ppm) | ESTAÇÃO PEDREIRAS II - MEARIM (ppm) | ESTAÇÃO PINDARÉ MIRIM - PINDARE (ppm) |
|------|---|--|--|---|--|
| 1977 | 9,17 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 1978 | 9,43 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 1979 | 44,34 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 1980 | 8,75 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 1981 | 20,50 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 1982 | 17,22 | ----- | ----- | 76,27 | ----- |
| 1983 | 33,87 | ----- | ----- | 114,08 | ----- |
| 1984 | 39,57 | ----- | ----- | 148,18 | ----- |
| 1985 | 50,68 | ----- | ----- | 123,50 | ----- |
| 1986 | 29,31 | ----- | ----- | 98,82 | ----- |
| 1987 | 68,03 | ----- | ----- | 75,38 | ----- |
| 1988 | 45,68 | ----- | ----- | 235,66 | ----- |
| 1989 | 34,51 | ----- | ----- | 126,79 | ----- |
| 1990 | 23,33 | ----- | ----- | 148,48 | ----- |
| 1991 | 15,12 | ----- | ----- | 67,01 | ----- |
| 1992 | 16,09 | ----- | ----- | 203,82 | 22,09 |
| 1993 | 17,62 | ----- | 216,48 | 55,97 | 32,74 |
| 1994 | 7,39 | ----- | 158,50 | 145,73 | 217,62 |
| 1995 | 16,65 | 12,00 | 177,96 | 118,33 | 73,10 |
| 1996 | 10,74 | 35,05 | 91,69 | 116,66 | 86,91 |
| 1997 | 12,06 | 16,02 | 113,91 | 111,52 | 76,56 |
| 1998 | 11,52 | 38,47 | 83,78 | 134,17 | 60,06 |
| 1999 | 5,56 | 10,66 | 95,67 | 112,00 | 64,82 |
| 2000 | 5,56 | 18,76 | 75,28 | 204,35 | 76,04 |

| | | | | | |
|------|------|-------|--------|--------|--------|
| 2001 | 6,34 | 13,71 | 78,88 | 148,30 | 75,83 |
| 2002 | 5,06 | 5,90 | 100,84 | 125,12 | 59,31 |
| 2003 | 4,91 | 3,36 | 84,55 | 119,46 | 61,51 |
| 2004 | 6,27 | 10,35 | 186,37 | 100,93 | 178,84 |
| 2005 | 5,59 | 4,40 | 33,04 | 88,96 | 57,10 |
| 2006 | 5,00 | 2,87 | 28,30 | 72,11 | 47,22 |
| 2007 | 5,86 | 6,19 | 14,29 | 45,68 | 44,19 |
| 2008 | 7,81 | 7,09 | 36,00 | 95,95 | 54,59 |

Os dados médios de C_{ss} de 1995 a 2008 mostram que o rio Mearim transporta mais sedimentos em suspensão (114 ppm ou mg/l) que o Araguari (7,78 ppm ou mg/l), ou seja, o Mearim transporta em média 14,6 vezes mais sedimentos em relação ao Araguari. O Rio Grajaú transporta em média 11 vezes (85,75 ppm ou mg/l), o Pindaré 9 vezes (72,57 ppm ou mg/l) e o Gurupi 1,7 vezes (13,2 ppm ou mg/l) mais sedimentos que o Araguari.

A figura 4.5 representa o comportamento da concentração de sedimentos em suspensão de 1977 até 2008. Devido à ausência de dados, apenas a estação de sedimentos Porto Platon apresentou resultados para todos os anos. As demais estações não possuíam dados completos e não puderam ser completados por não apresentarem um padrão linear que possibilitasse a extrapolação a partir de modelagem.

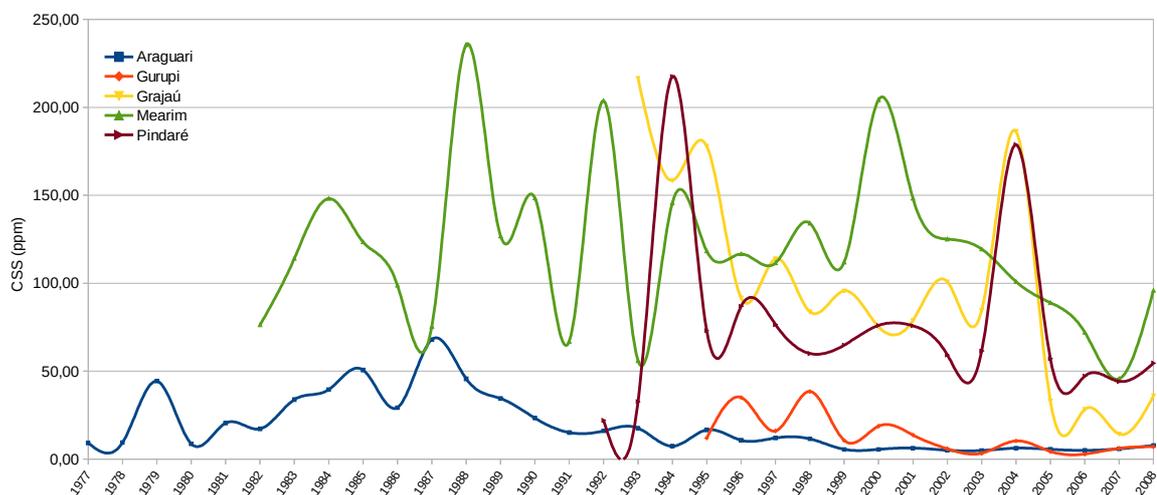


Figura 4.5: Variações dos dados anuais médios de concentração de sedimentos em suspensão nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim.

A figura 4.6 destaca a concentração de sedimentos em suspensão entre 1995 e 2008. Podemos observar que os rios Pindaré, Grajaú e Mearim possuem concentrações superiores aos rios Araguari e Gurupi. Essas diferenças não possuem relação direta com a vazão, ou seja,

os resultados obtidos variam independente do volume d'água escoado nos rios. Esse resultado sugere que outras variáveis estão influenciando na concentração de sedimentos em suspensão.

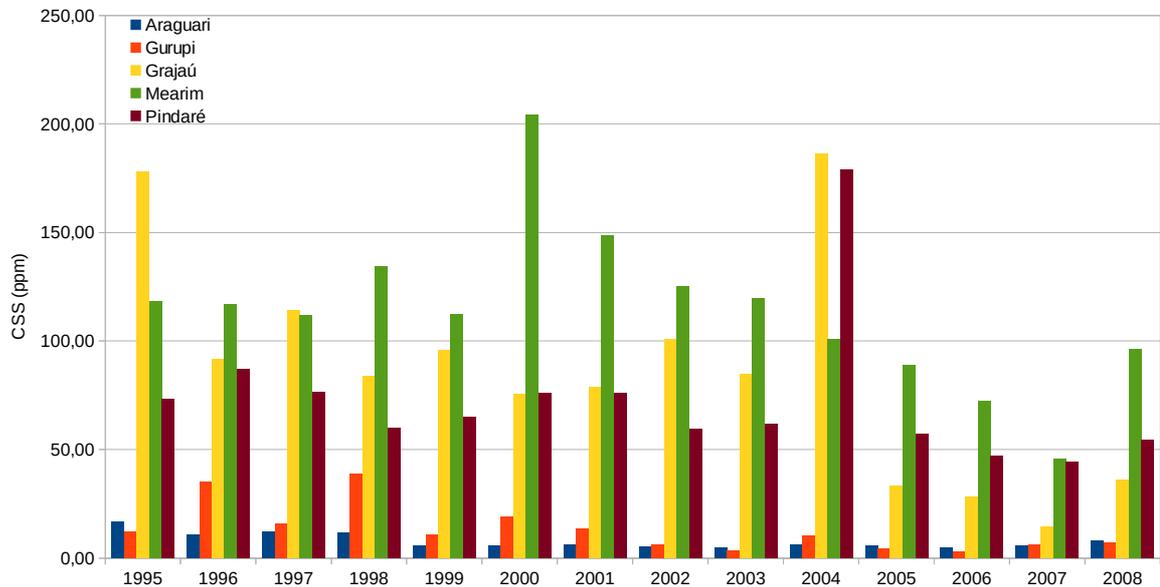


Figura 4.6: Comparação do comportamento da concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) dos rios no período de 1995 a 2008.

O regime pluviométrico é importante no balanço e carga de sedimentos em suspensão em um rio, porém outras variáveis influenciam na quantidade de sedimentos na vazão de um rio. Dentre essas variáveis podemos citar a cobertura e uso do solo, pois solos com maior cobertura vegetal tendem a possuir menos erosão em relação a áreas com solo exposto e pastagem.

O conhecimento sobre a concentração de sedimentos em suspensão é bastante importante para avaliarmos as consequências da intervenção humana nas bacias hidrográficas devido ao desmatamento, atividades agrícolas ou mineração (Viers et al., 2009).

4.3.3- Médias anuais de descarga sólida em suspensão (Q_{ss}).

A partir dos dados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão, calculou-se a descarga sólida em suspensão (Q_{ss}) para os rios analisados. Utilizando a equação simplificada de Colby (1957) obtivemos os valores em toneladas por ano (tabela 4.6).

Tabela 4.6: Dados anuais médios de carga sólida em suspensão (Qss) obtidos a partir de dados diários nas estações fluviométricas de Porto Platon (AP), Alto Bonito (PA), Pindaré-Mirim (MA), Aratoi Grande (MA) e Pedreiras II (MA).

| ANO | Qss (Araguari) | Qss (Gurupi) | Qss (Grajaú) | Qss (Mearim) | Qss(Pindaré) |
|------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1977 | 273105,08 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 1978 | 267049,84 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 1979 | 1391707,38 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 1980 | 236445,62 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 1981 | 380759,52 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 1982 | 541938,66 | ----- | ----- | 203845,86 | ----- |
| 1983 | 418231,12 | ----- | ----- | 192864,42 | ----- |
| 1984 | 1136552,52 | ----- | ----- | 499541,65 | ----- |
| 1985 | 1586151,77 | ----- | ----- | 725911,44 | ----- |
| 1986 | 867477,38 | ----- | ----- | 479707,23 | ----- |
| 1987 | 1672821,69 | ----- | ----- | 170993,80 | ----- |
| 1988 | 1244708,90 | ----- | ----- | 680945,82 | ----- |
| 1989 | 1430312,57 | ----- | ----- | 392476,98 | ----- |
| 1990 | 783760,50 | ----- | ----- | 376587,79 | ----- |
| 1991 | 520425,43 | ----- | ----- | 149877,70 | ----- |
| 1992 | 328288,40 | ----- | ----- | 448698,11 | 66005,72 |
| 1993 | 514945,81 | ----- | 205895,52 | 82928,38 | 77186,38 |
| 1994 | 255814,67 | ----- | 618881,64 | 409973,26 | 1184434,14 |
| 1995 | 614469,45 | 193197,70 | 663004,77 | 410732,43 | 361173,14 |
| 1996 | 425950,54 | 625154,25 | 404333,99 | 477704,11 | 538545,32 |
| 1997 | 284080,72 | 188447,48 | 357732,47 | 282321,50 | 253726,05 |
| 1998 | 233922,26 | 365214,84 | 104552,60 | 224110,27 | 162586,34 |
| 1999 | 159178,19 | 173642,25 | 278807,61 | 267625,62 | 311734,94 |
| 2000 | 214499,67 | 326825,38 | 311127,72 | 830911,75 | 499016,11 |
| 2001 | 207957,22 | 246544,11 | 238588,29 | 386133,75 | 306893,11 |
| 2002 | 155928,32 | 95476,47 | 281979,15 | 283309,26 | 272626,14 |
| 2003 | 140622,47 | 53529,82 | 206492,83 | 273967,73 | 275287,02 |
| 2004 | 152144,63 | 136423,66 | 569786,52 | 346194,04 | 1352635,59 |
| 2005 | 135934,78 | 57114,91 | 60929,82 | 207253,75 | 220286,32 |
| 2006 | 148695,87 | 39751,63 | 98101,26 | 186507,35 | 204134,89 |
| 2007 | 163275,31 | 75349,01 | 40948,28 | 85289,71 | 180584,20 |
| 2008 | 283828,09 | 128207,40 | 141230,82 | 332265,38 | 155480,78 |

A figura 4.7 destaca o comportamento da descarga sólida em suspensão dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim. Apenas o rio Araguari possui dados anuais desde 1977. Para os demais rios, foi calculada a descarga sólida em suspensão apenas para os anos que possuíam dados de concentração de sedimentos em suspensão.

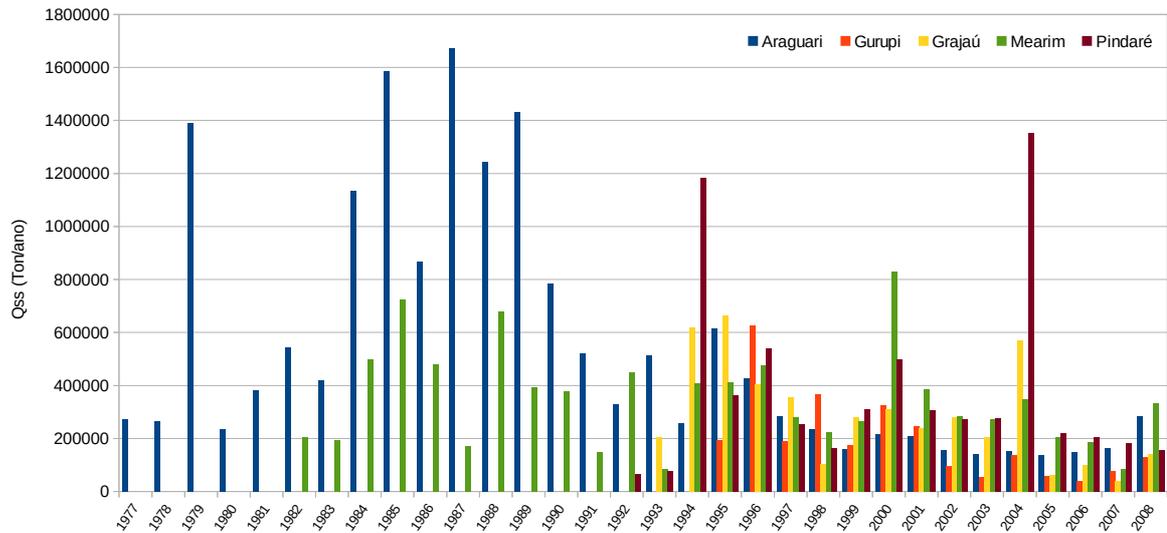


Figura 4.7: Variações dos dados anuais médios de descarga sólida em suspensão nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim.

Pode-se somar os dados de concentração de sedimentos em suspensão dos rios Pindaré, Grajaú e Mearim para ter uma noção do total da descarga sólida em suspensão que é direcionada para o estuário do Mearim. Esses rios desembocam na Baía de São Marcos.

A figura 4.8 resume a descarga de sólida em suspensão de acordo com os principais estuários que deságuam os rios Araguari (fóz do Araguari), Gurupi (fóz do Gurupi), Pindaré, Grajaú e Mearim (fóz do Mearim).

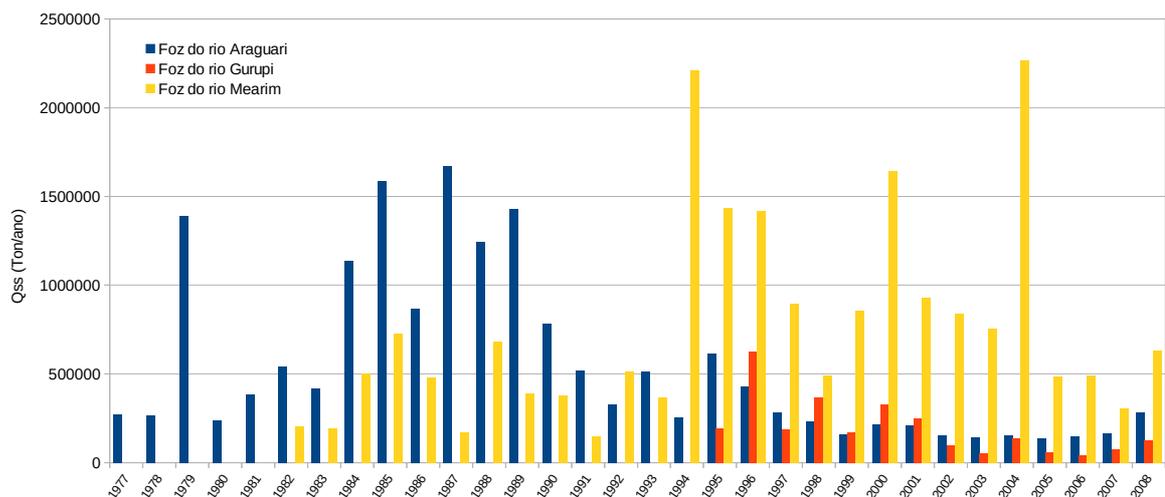


Figura 4.8: Descarga sólida em suspensão direcionada para os estuários do rios Araguari (AP), Gurupi (PA/MA) e Mearim (MA).

Entre 1977 e 2008 pode-se identificar uma tendência a diminuição na descarga sólida em suspensão no rio Araguari. A descarga sólida em suspensão média do rio Araguari de 1977

a 2008 foi de 536.593 ton/ano. Há um comportamento diferenciado no rio Araguari que apresenta tendências opostas em relação a vazão e concentração de sedimentos em suspensão (figura 4.9).

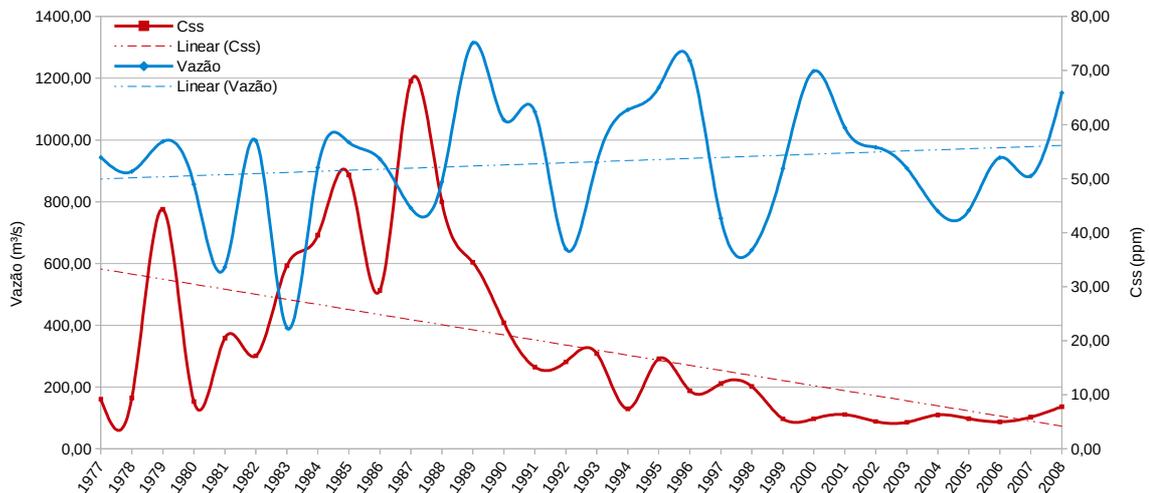


Figura 4.9: Relação Vazão x C_{ss} no rio Araguari. O gráfico mostra linhas de tendências opostas entre vazão e sedimentos em suspensão.

O rio Araguari registrou uma redução na descarga sólida em suspensão a partir de 1987 ao contrário da vazão que apesar das variações anuais apresentou uma tendência de aumento do volume de água que passa pelo canal.

As altas taxas de concentração de sedimentos de 1977 a 1987 (10 anos) mascaram a tendência atual do rio. No período de 1977 a 1987 a concentração de sedimentos média correspondeu a 797.476 ton/ano.

A figura 4.10 demonstra a descarga sólida média de todos os rios no intervalo de 1995 a 2008 (período em que todas as estações de sedimentos coletaram dados de concentração de sólidos em suspensão).

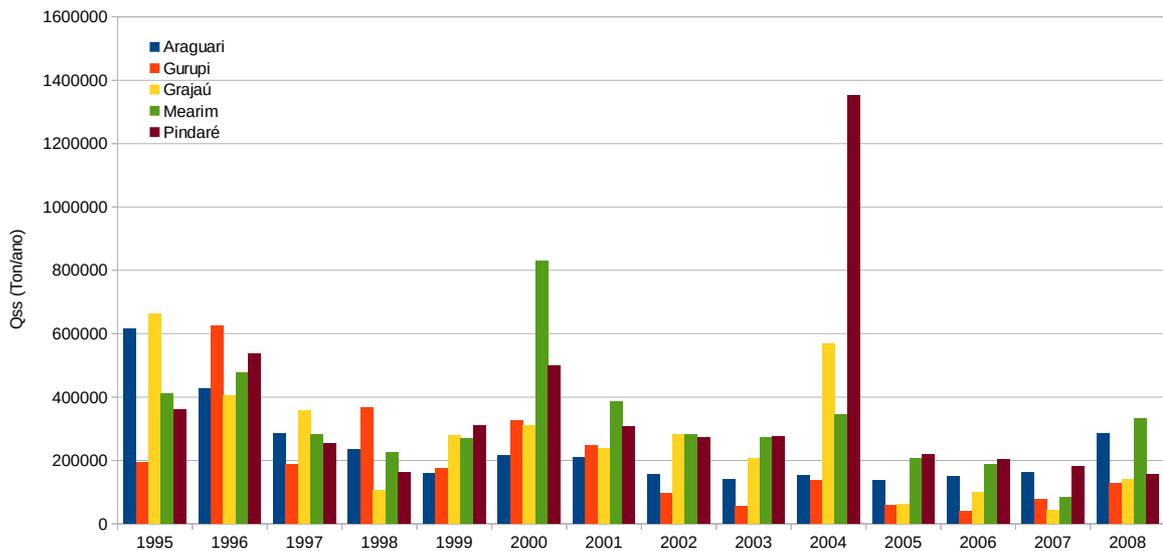


Figura 4.10: Comparação da descarga sólida em suspensão (Qss) nos rios entre 1995 e 2008.

Os dados médios de descarga sólida em suspensão entre 1995 e 2008 apresentaram os seguintes resultados: Araguari = 237.178 ton/ano; Gurupi = 193.203 ton/ano; Pindaré = 363.908 ton/ano; Grajaú = 268.401 ton/ano; Mearim = 328.166 ton/ano.

Em 2004 houve uma contribuição na descarga sólida dos rios maranhenses bastante representativa que levou ao total que superou dois milhões e duzentas mil toneladas de sedimentos.

A descarga sólida em suspensão dos rios Pindaré, Grajaú e Mearim foram somadas para ter a noção do volume de sedimentos que vão para o golfo maranhense. A figura 4.11 representa a descarga sedimentar nos rios Araguari, Gurupi e Mearim.

De 1995 a 2008 percebemos uma contribuição de carga sedimentar superior para a foz do rio Mearim em relação aos rios Araguari e Gurupi. O rio Gurupi superou o Araguari nos anos de 1996, 1998, 2000 e 2001 na descarga sólida em suspensão, porém nos anos restantes o Araguari foi superior.

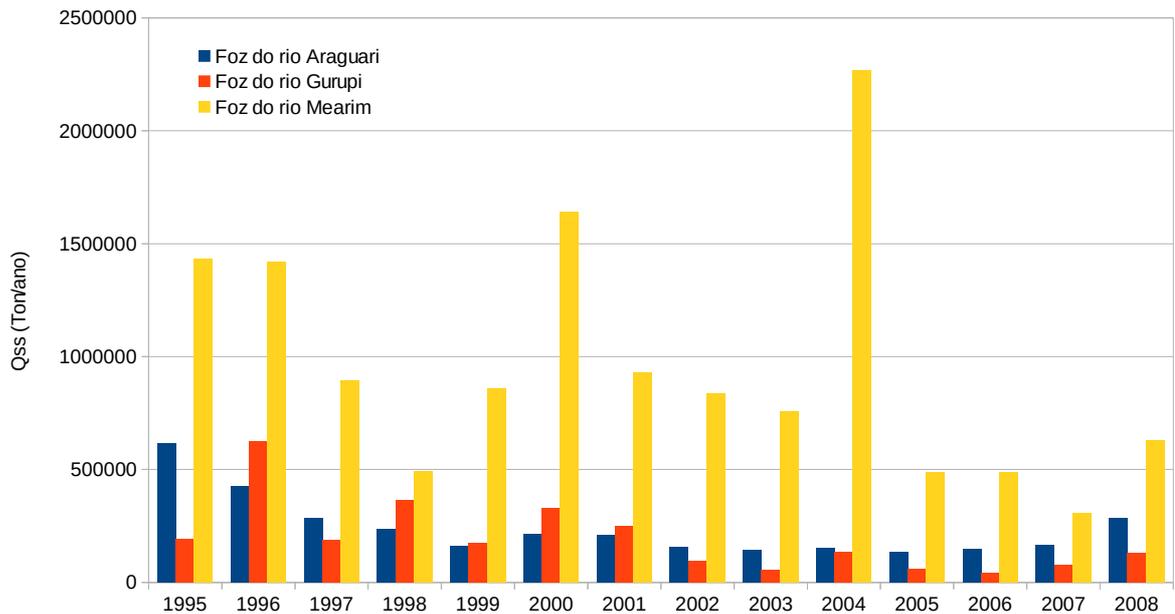


Figura 4.11: Descarga sólida em suspensão nos rios Araguari, Gurupi e Mearim entre os anos de 1995 a 2008.

4.3.4- Evolução das áreas de manguezais nos estuários dos rios Araguari, Gurupi e Mearim.

A tabela 4.7 apresenta a área de manguezais na foz dos rios Araguari, Gurupi e Mearim por década.

Tabela 4.7: Área de manguezais em km² nas décadas de 1970, 1990 e 2000 nos estuários e adjacências dos rios Araguari, Gurupi e Mearim.

| FOZ | 1970 | 1990 | 2000 |
|----------|------|------|------|
| ARAGUARI | 1117 | 1099 | 1067 |
| GURUPI | 358 | 429 | 431 |
| MEARIM | 800 | 645 | 859 |

A figura 4.12 mostra o comportamento da dinâmica das áreas de manguezais ao longo dos anos mapeados. O Araguari apresentou redução de área correspondendo a 50 km² de 1975 a 2008. O Gurupi teve acréscimo de 73 km² de 1975 a 2008. Na foz do Mearim houve uma

redução de 1975 a 1996 de 155 km², porém de 1996 a 2008 houve um acréscimo de 214 km² resultando em um balanço positivo de acresção de área em 59 km².

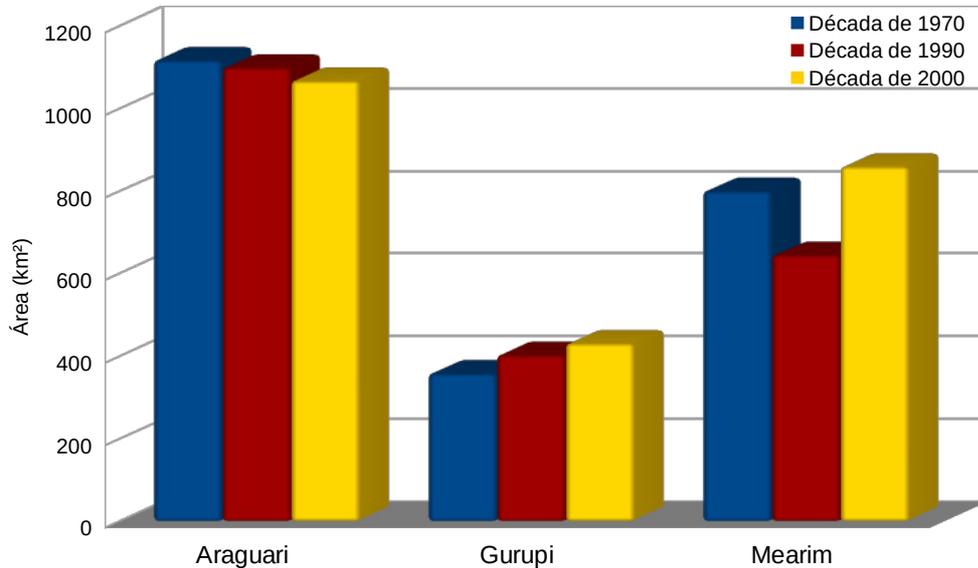


Figura 4.12: Representação gráfica da quantificação de áreas de manguezal nos estuários dos rios Araguari, Gurupi e Mearim por década.

Na figura 4.13 verifica-se o comportamento dos manguezais nos estuários dos rios Araguari, Gurupi e Mearim. Seleccionamos uma área maior que a foz do rio Araguari que abrange a região da Reserva Biológica Lago Piratuba e porção sul da ilha de Maracá. Ampliamos a extensão desta área para tentar compreender a dinâmica do transporte e deposição de sedimentos de acordo com a direção da CCNB que segue da foz do Araguari em direção ao canal de Maracá a noroeste. Portanto, há uma possibilidade maior de sedimentação costeira nessa região.

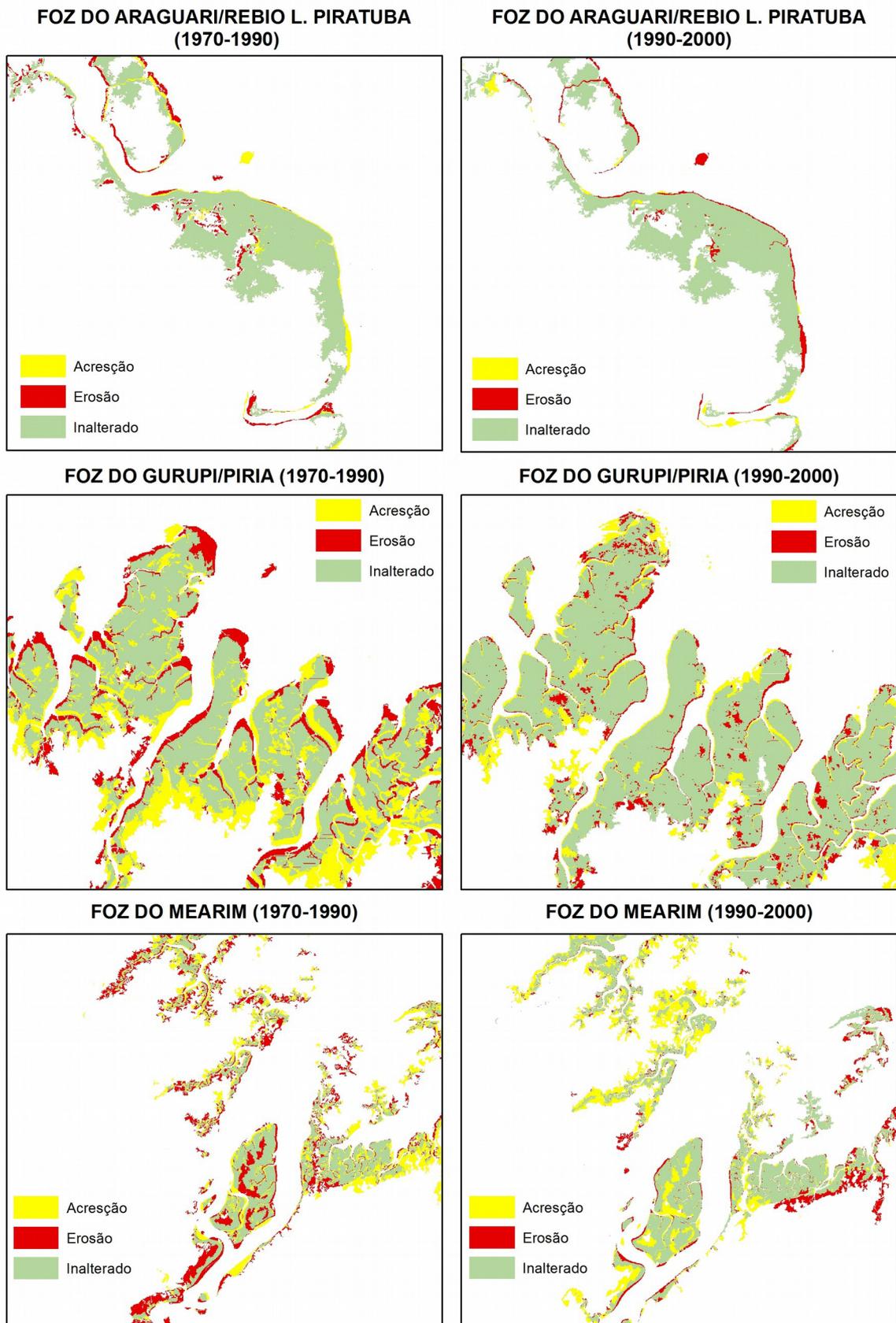


Figura 4.13: Detecção de mudanças na foz e adjacências dos rios Araguari, Gurupi e Mearim entre as décadas de 1990 e 2000.

Entre 1975 e 1996 ocorreram erosões nas margens da foz do rio Araguari. A hidrodinâmica nesse estuário e resultante da interação da descarga do rio com a intrusão da maré, essa intrusão pode influenciar na erosão nas margens do estuário. Identificou-se acresção de área na linha de costa onde está situada a Reserva Biológica Lago Piratuba. Surgiu uma pequena ilha nas proximidades da ilha de Maracá. Nesse período as mudanças corresponderam a 60 km² de áreas acrescidas, 78 km² de erosão e 1039 km² de área inalterada. Durante o período de 1997 a 2008 a erosão se acentuou na linha de costa da REBIO Lago Piratuba e ocorreu acresção nas margens da foz do Araguari. Essa acresção na foz pode ser resultado não do aumento da descarga sólida em suspensão, mas do manejo inadequado do solo na atividade de bubalinocultura extensiva nos campos herbáceos próximos ao estuário (Meirelles & Mochuitti, 2000; Santos, 2006). A área de acresção para o período de 1997 a 2008 corresponde a 31 km², a erosão corresponde a 74 km² e a área inalterada foi de 1036 km². A área de acresção para o período de 1997 a 2008 corresponde a 31 km², a erosão corresponde a 74 km² e a área inalterada foi de 1036 km².

Na foz do rio Gurupi e Piriá, entre 1975 a 1996, os manguezais cresceram em área em direção ao planalto costeiro sofrendo erosão na linha de costa. De 1975 a 1996 a acresção correspondeu a 162 km², a erosão foi de 91 km² e as áreas sem alteração de manguezal foi de 267 km². Entre 1997 a 2008 a acresção não foi tão representativa quanto o período anterior. Ocorreu uma moderada estabilização da linha de costa prevalecendo os processos de redução de área no interior das florestas de mangue. A diminuição pode ser consequência da redução da descarga sólida em suspensão ao longo dos últimos anos. A acresção correspondeu a 73 km² enquanto a área reduzida de manguezal foi de 71 km² e a área inalterada foi de 358 km².

No estuário do rio Mearim observamos uma situação bastante comum resultante da interação entre maré e descarga fluvial. Trata-se de áreas recolonizadas pelo manguezal. Na Ilha do Caranguejo identificou-se áreas de manguezal que foram reduzidas de 1975 a 1996 e essas mesmas áreas são recolonizadas em função das grandes marés que carregam sedimentos e nutrientes trazidos pelos rios. No período de 1975 a 1996 a área de acresção correspondeu a 206 km², a erosão foi de 361 km² e as áreas inalteradas correspondiam a 439 km². Durante o período de 1997 a 2008 a acresção foi 316 km², a erosão foi de 102 km² e as áreas inalteradas foi de 543 km².

A figura 4.14 relaciona a descarga sólida em suspensão no rio Araguari com a área de manguezais na foz e adjacências do rio. Os manguezais sofrem redução em área de 1977 a 2008. Essa redução é acompanhada pela diminuição da carga sólida em suspensão.

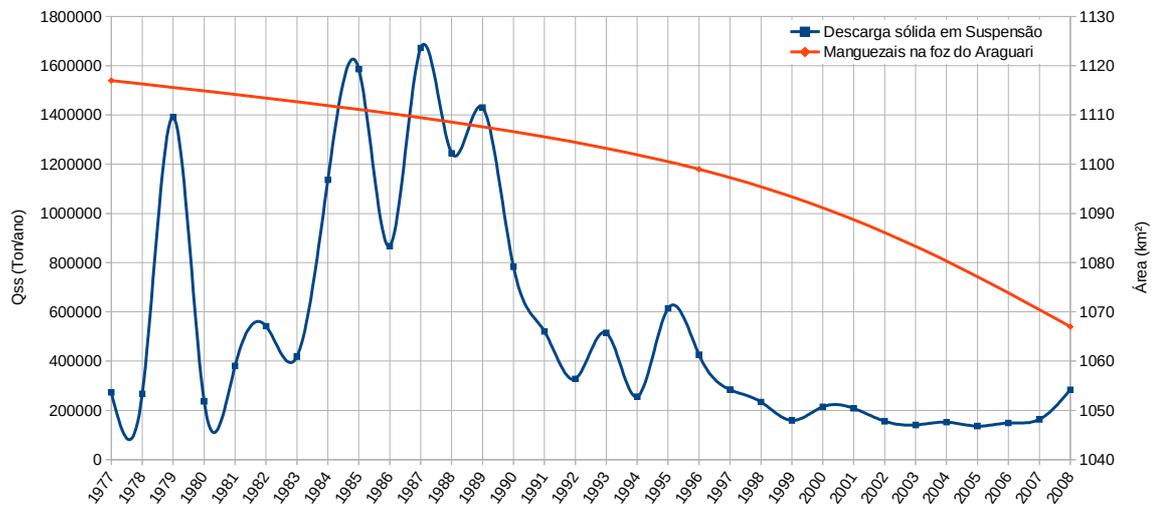


Figura 4.14: Relação entre a descarga sólida em suspensão e a área de manguezal na foz do rio Araguari.

A figura 4.15 mostra a relação da descarga sólida em suspensão do rio Gurupi com a dinâmica das áreas de manguezal na foz do rio e adjacências (foz do rio Piriá). A área foi selecionada de acordo com o conhecimento da direção da corrente marinha da Guiana que se desloca pelo litoral no sentido Sudeste -Noroeste. Portanto os sedimentos, passíveis de floculação e sedimentação no litoral, podem se acumular nas áreas vizinhas à foz do rio Gurupi que a sua esquerda está o estuário do rio Piriá. Os dados de sedimentos em suspensão para o rio Gurupi são a partir de 1995. No gráfico identificamos um aumento das áreas de manguezais de 1977 a 1996. Esse aumento pode estar relacionado com o aumento da concentração de sedimento, consequentemente no aumento da descarga sólida em suspensão. Contudo, de 1997 a 2008 percebe-se uma tendência a estabilização das áreas de manguezal, pois a acreção e erosão durante o período obtiveram quase mesma importância (acreção de 73 km² e erosão de 71 km²). De 1996 a 2008, percebemos uma diminuição da descarga sólida de sedimentos que pode estar influenciando no aumento de áreas de erosão, porém a média de descarga de sedimentos é alta (193 mil toneladas por ano) os manguezais podem ter expandido mais apesar dessa diferença ser pequena no balanço entre acreção e erosão (2 km² a mais de áreas acrescida).

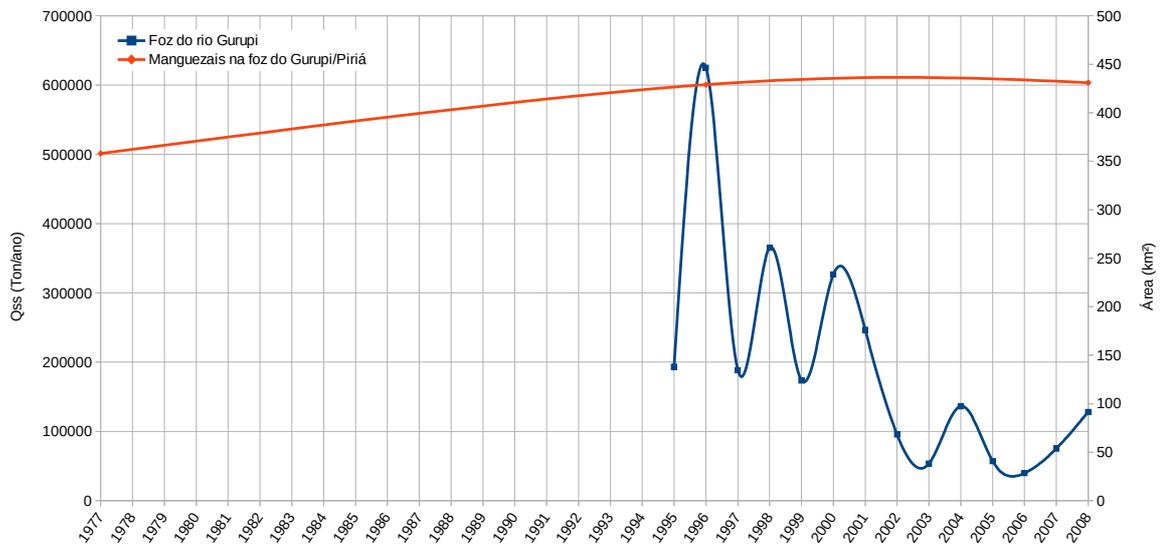


Figura 4.15: Relação entre a descarga sólida em suspensão e a área de manguezal na foz do rio Gurupi/Piraiá.

Abaixo temos a figura 4.16 reunindo a soma da descarga sólida em suspensão dos rios Pindaré, Grajaú e Mearim e o comportamento dinâmico das áreas de manguezal na foz do rio Mearim (Baía de São Marcos). Os dados de 1982 a 1991 são referentes apenas ao rio Mearim, pois os dados de sedimentos obtidos para os rios Pindaré (a partir de 1992) e Grajaú (a partir de 1993) eram referentes apenas a partir da década de 1990. Diante da limitação de dados, reunimos os dados de descarga sólida em suspensão que foram possíveis de serem calculados.

O importante é analisar os picos de descarga sólida em suspensão nos anos de 1994, 2000 e 2004. Esse comportamento acima da média na descarga sólida em suspensão pode ter contribuído para a recuperação das áreas de manguezais na foz do rio Mearim.

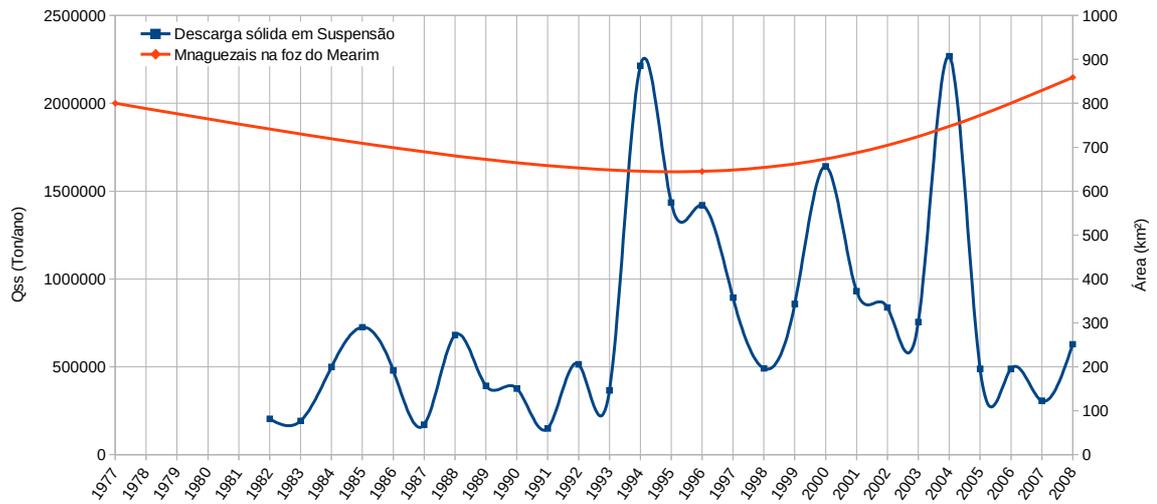


Figura 4.16: Relação entre a descarga sólida em suspensão e a área de manguezal na foz do rio Mearim.

4.4- DISCUSSÃO.

A maior parte da descarga sólida é representada pelo sedimento em suspensão podendo representar 95% da descarga sólida total. Por esse motivo, as medições diárias e a maior parte dos eventos individuais só contemplam o sedimento em suspensão (Carvalho & Filizola Júnior, 2000).

A figura 4.17 demonstra a distribuição vertical no transporte de sedimentos nos rios de acordo com Carvalho (2008).

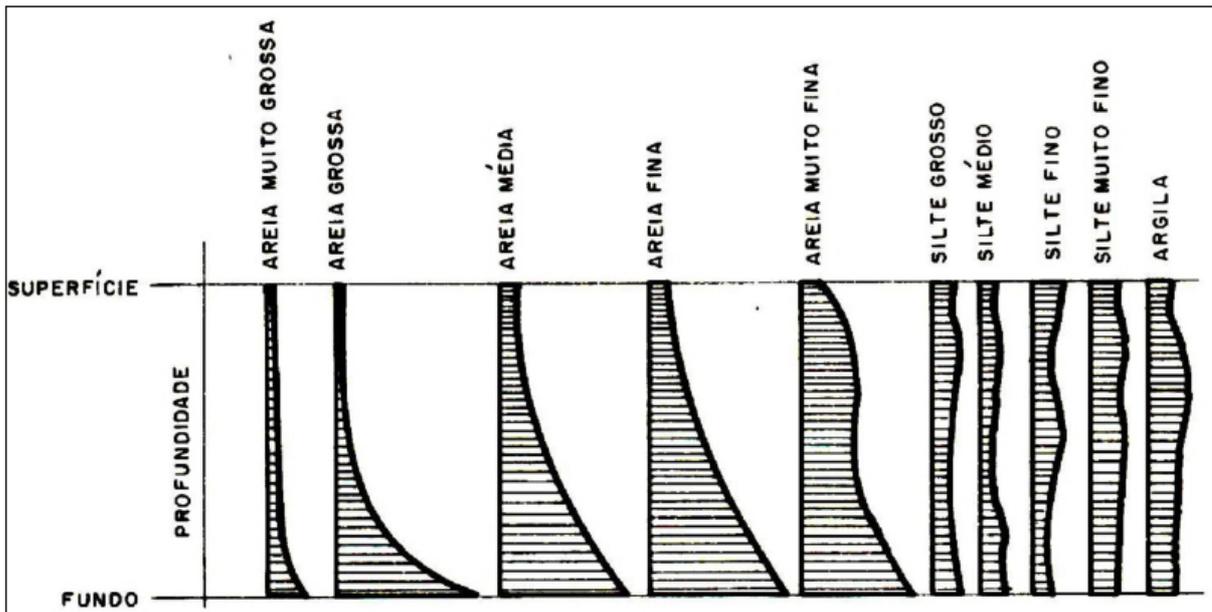


Figura 4.17: Distribuição vertical no transporte de sedimentos nos rios (Fonte: Carvalho, 2008).

Os sedimentos finos são transportados ao longo de toda a coluna d'água, ou seja, do leito a superfície encontramos frações de areia muito fina a argila em mesma proporção. Com o aumento da profundidade encontramos as frações maiores de areia muito grossa a areia fina que são transportados por arrasto e saltação no leito dos rios (Carvalho & Filizola Jr., 2000).

Para os mangues as fontes de sedimento são muito importantes pois esta vegetação utilizar novas áreas de sedimentação para expandir a sua cobertura vegetal, já que seu estabelecimento e sobrevivência dependem do equilíbrio entre erosão e sedimentação nas áreas costeiras (Godoy, 2015).

Os estuários são o destino dos sedimentos produzidos nas bacias hidrográficas e nas áreas costeiras adjacentes. Os sedimentos acumulam em determinadas áreas fazendo com que apareçam ilhas e bancos de areia e lama ao longo do estuário. Chamamos de assoreamento quando ocorre esse preenchimento sedimentar na bacia de deposição (Suguio, 1998).

Os manguezais se fixam nas linhas de costa sedimentares e áreas intermarés das zonas tropicais e subtropicais. Possuem adaptações (morfológicas e fisiológicas) para combater os estresses ambientais encontrados em áreas costeiras como alta salinidade, poucos nutrientes, baixa concentração de oxigênio dissolvido na água intersticial nos sedimentos e substrato móvel (Ellison & Stoddart, 1991).

O manguezal possui a característica de acumular sedimento e se ajustar à elevação do nível do mar. Caso as taxas de acreção de sedimentos forem similares às da elevação do nível

do mar, os manguezais conseguem se manter nas áreas de inundação entre marés. Em um cenário em que a taxa de sedimentação é inferior a elevação do nível do mar, a vegetação de mangue tende a migrar para o interior do continente ou sofre redução de sua extensão (Shearman, 2010).

O rio Araguari representa o sistema de drenagem mais representativo no Amapá, depois do rio Amazonas. Seu estuário localiza-se no Cabo Norte sendo atualmente ocupado por inúmeras fazendas que utilizam a sua planície de inundação para a criação de gado e bubalinos (Santos, 2006). De acordo com o PROVAM (1990), o assoreamento no baixo curso do rio Araguari ocorre devido ao escoamento em parte dos sedimentos provenientes da região dos lagos e drenagens adjacentes que deságuam no rio Araguari.

O Cabo Norte é um divisor de processos geológicos e oceanográficos diferenciados, ao longo da costa amapaense (Magnanini, 1952). Esses processos geológicos e oceanográficos diferenciados influenciam na formação da linha de costa atual amapaense apresentando setores progradacionais e erosionais, podendo ser dividido em quatro porções (Silveira e Santos, 2003).

Os setores progradacionários estão localizados no extremo Norte do estado (Cabo Orange) e foz do rio Amazonas. Os sedimentos lamosos que formam as áreas de acreção são oriundos do rio Amazonas predominantemente e se acumulam nas proximidades dos rios Oiapoque e Cassiporé (Santos, 2006). Outras formações acrescionárias são perceptíveis entre a foz do rio Araguari e Amazonas na formação e modificação de ilhas na foz do rio Amazonas (Silveira et al., 2002).

Os setores erosionais localizam-se ao sul do cabo Cassiporé e no Cabo Norte entre Ilha de Maracá e Foz do rio Araguari. Os setores retrogradacionais predominam na costa do Amapá sendo associados a presença de macromarés, pois potencializam o fenômeno da pororoca e produzem fortes correntes com grande energia para remoer e erodir sedimentos. A presença da Corrente Costeira Norte Brasileira (CCNB) interfere na direção da pluma de sedimentos do rio Amazonas e impem a dispersão desses sedimentos para regiões mais profundas do mar, permitindo a sua deposição ao longo da costa da Guiana e na plataforma continental do Amazonas (Santos, 2006).

A figura 4.18 representa os setores progradacionais e retrogradacionais da foz do rio Amazonas ao Cabo Orange, costa do Amapá.

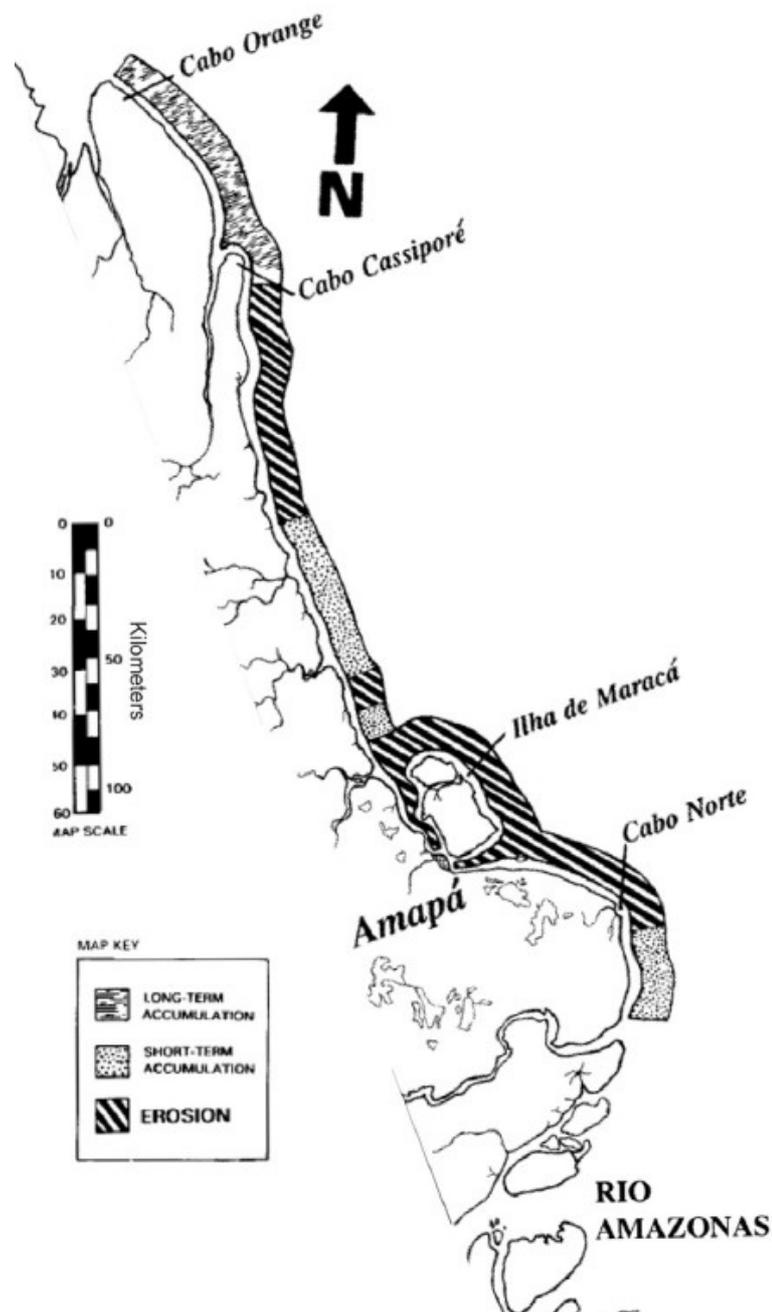


Figura 4.18: Representação das áreas costeiras em acresção e erosão da foz do Amazonas ao Cabo Orange, Amapá / Fonte: elaborado por Gensac et al. (2016) com base em Nitrouer et al. (1991).

Apesar da carga sólida em suspensão dos rios Amazonas e Araguari serem expressivas, os processos oceanográficos são responsáveis pelo predomínio de setores erosivos na costa do Amapá.

Dessa forma, pode-se interpretar a colonização dos mangues junto ao litoral do Amapá como sinal da estabilidade do sedimento na planície de maré lamosa (Lefebvre et al., 2004) e quando as ondas incidem no litoral, os sedimentos da planície de intermaré são removidos deixando a vegetação de manguezal desprotegida e sujeita à erosão (Allison & Lee, 2004).

Na Costa Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão, os processos oceanográficos estão possibilitando áreas de progradação no interior dos estuários e setores de erosão na linha de costa. Os manguezais, em sua maioria, estão expandindo em direção ao continente, em resposta ao aumento do nível do mar e intrusão salina (Godoy, 2015).

A migração dos manguezais para o interior parece ser a principal resposta dos ecossistemas de manguezais diante às mudanças climáticas e depende de vários fatores que determinam a configuração do ambiente, primariamente precipitação e variabilidade da temperatura (Godoy e Lacerda, 2014). A interação entre a geomorfologia da planície costeira, as taxas de sedimentação elevadas e a taxa de elevação do nível do mar são os principais parâmetros que controlam a magnitude da migração em direção à terra (Godoy, 2015).

4.5- CONCLUSÕES.

A descarga sólida em suspensão de um rio é o resultado de uma série de fatores como precipitação, escoamento, tipo de solo, topografia, cobertura vegetal e atividades antrópicas. Calculamos a descarga sólida em suspensão indiretamente a partir da média anual de concentração de sedimentos em suspensão e vazão através do método simplificado de Colby (1957).

Concluimos que a vazão média do rio Araguari é superior aos demais rios analisados chegando a possuir 10 vezes mais volume d'água em seu canal que o rio Mearim. Mas ao analisar a concentração de sedimentos em suspensão essa relação inverte, pois o rio Mearim apresentou médias que chegam a ser 14,6 vezes superior as concentrações do Araguari. O mesmo acontece para as médias de concentração de sedimentos em suspensão nos rios Pindaré (9 vezes maior) e Grajaú (11 vezes maior).

No balanço final, ao calcular a descarga sólida em suspensão, os rios no Estado do Maranhão (Pindaré, Grajaú e Mearim) apresentaram carga sedimentar superior aos rios com maior volume d'água (Araguari e Gurupi).

Ao relacionar a descarga sólida em suspensão com a dinâmica nas áreas de mangue na foz dos rios Araguari, Gurupi e Mearim, percebemos que a redução dos manguezais na foz do Araguari e adjacências pode estar recebendo influência da redução do aporte sedimentar e o aumento das áreas de manguezais na Baía de São Marcos pode estar relacionado com o aumento de carga de sedimentos em anos com concentrações superiores a média (a exemplo de 2004 que apresentou grande concentração de sedimentos e descarga sólida nos rios Pindaré, Gurupi e Mearim). Na foz do Gurupi encontramos uma tendência a estabilização das áreas de mangue ao analisar o período de 1995 a 2008 onde o balanço entre acreção e erosão foi positivo com aumento de apenas 2 km² de área. Esse balanço pode ser resultado também da redução do aporte sedimentar no rio Gurupi, visto que nos anos anteriores (de 1975 a 1996) os manguezais expandiram 1,8 vezes mais em relação as áreas reduzidas. Portanto, os rios do litoral maranhense transportam mais sedimentos para os estuários em relação ao Araguari que possui volume de água superior.

Para compreender e mensurar a importância da vazão e C_{ss} nos processos de floculação e sedimentação na zona costeira, precisamos analisar a interação com as marés, correntes marinhas e padrões de circulação nos estuários.

Podemos perceber que existe uma relação muito fraca entre as variáveis hidrossedimentológicas Vazão e Concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}). Compreender as variações nos valores anuais de vazão e C_{ss} é uma tarefa importante porém complexa. Entretanto, buscaremos analisar os processos que podem influenciar nas variáveis hidrossedimentológicas.

CAPÍTULO 5: ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE AS ANOMALIAS DE TEMPERATURA DOS OCEANOS PACÍFICO EQUATORIAL E ATLÂNTICO NORTE COM A VAZÃO DOS RIOS ARAGUARI, GURUPI, PINDARÉ, GRAJAÚ E MEARIM.

5.1- INTRODUÇÃO.

O clima de uma região é definido por fatores climáticos que atuam em escala global e regional. Dentre os fatores que definem o clima em uma determinada região podemos citar a circulação geral da atmosfera, o relevo local, as diferentes coberturas vegetais, o ciclo hidrológico e as correntes oceânicas para regiões costeiras (Molion, 1987).

Na zona costeira amazônica os principais mecanismos que controlam a precipitação na região são a Alta da Bolívia (baixa térmica da superfície causada por uma das células de circulação atmosférica de Hadley-Walker), a Zona de Convergência Intertropical (formada pela confluência dos ventos alísios do hemisfério Norte com o sul), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Linhas de Instabilidade (LI), Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), Ondas de Leste e Brisas terrestre e marítima. (Molion et al., 1987; Cohen et al., 2009)

Sabemos que variações na temperatura da superfície do mar podem influenciar no regime de precipitações de uma região. Como exemplo, podemos citar os eventos El Niño (EN) e La Niña (LN) que são anomalias de temperatura da superfície do mar no Pacífico Equatorial influenciando no regime de precipitações na região sul do Brasil (Grimm et al., 1998).

Este mesmo fenômeno (El Niño Oscilação Sul - ENOS) se relaciona com as precipitações na região amazônica ocasionando em diminuição da precipitação e aumento de secas durante o aumento da TSM (Temperatura da Superfície do Mar) e aumento da precipitação e vazão dos rios na diminuição da TSM no oceano Pacífico (CPTEC/INPE, 2016).

De acordo com Enfield e Mayer (1997), no oceano Atlântico Tropical Norte há anomalias de TSM associadas com o ENOS com defasagem de 4 a 5 meses, ou seja, essas variáveis não são totalmente independentes e estão relacionadas a certos padrões de precipitação.

Diante dessa situação, o objetivo deste capítulo é analisar a existência de causalidade entre as anomalias de temperatura da superfície do mar no Pacífico Equatorial Sul e Atlântico

Tropical Norte com as vazões nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim localizados na zona costeira amazônica.

5.2- MATERIAIS E MÉTODOS.

Para realizar esta etapa da pesquisa, foi adquirido dados de anomalia de TSM dos oceanos Pacífico Equatorial Sul (1) e Atlântico Tropical Norte(2). Os dados médios de vazão, obtidos no capítulo 4, foram correlacionados com as anomalias referentes ao ENOS (3) e ao NTA (4). A figura 5.1 indica os passos realizados.

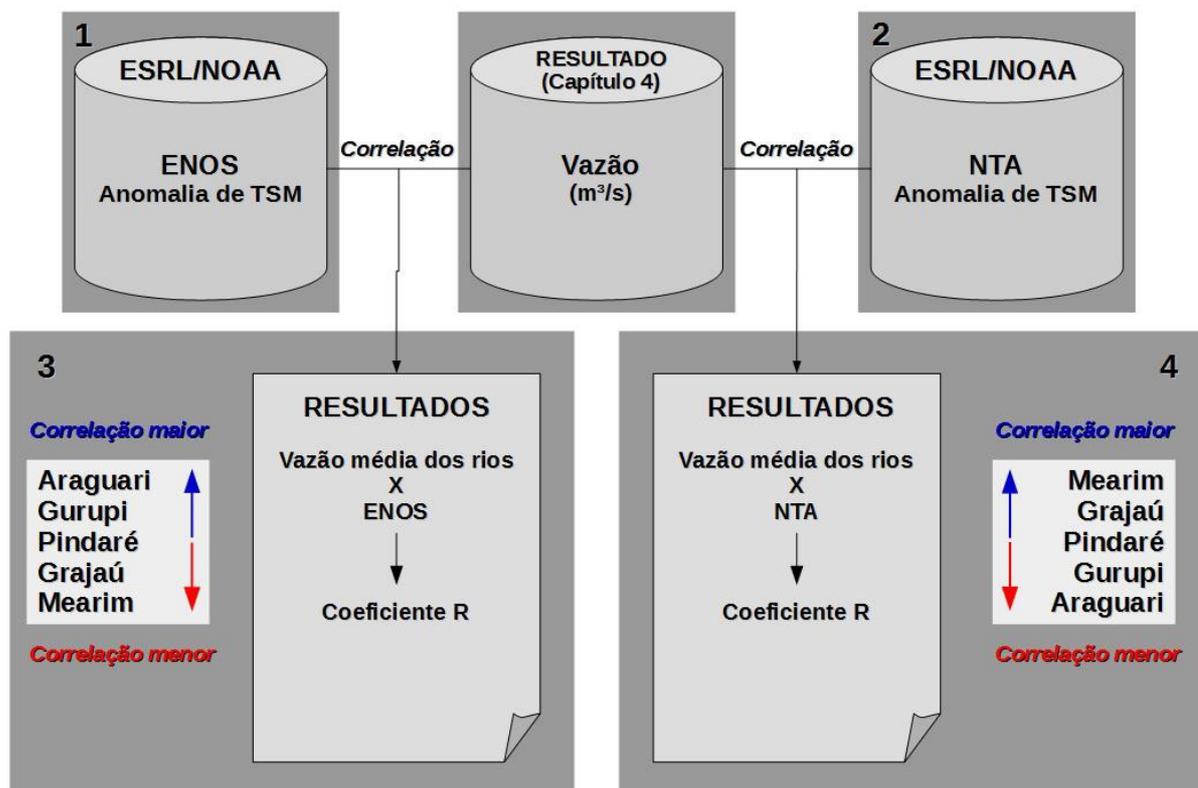


Figura 5.1: Fluxograma resumindo as etapas realizadas no capítulo 5.

Os dados foram adquiridos em formato ASCII no site do Earth System Research Laboratory/National Oceanic & Atmospheric Administration (ESRL/NOAA). Os arquivos são referentes aos valores médios mensais de anomalia da TSM para os índices de TSM.

O índice TSM (Temperatura da Superfície do Mar) ou SST index (Sea Surface Temperature index) são regiões (áreas) sobre os oceanos onde são medidas as temperaturas médias e anomalias da superfície do mar. É muito importante mensurar a temperatura da superfície dos oceanos nessas áreas, pois as variações de temperatura influenciam o tempo meteorológico no planeta (precipitações, secas, tempo quente, tempo frio, direção dos ventos, força dos ventos, etc.). Foram selecionados os dados dos índices Niño 1+2 e do Atlântico Tropical Norte (NTA – North Tropical Atlantic) entre 1948 e 2016.

A partir dos dados mensais médios, calculamos as médias anuais de 1977 a 2008. Este intervalo de 32 anos foi selecionado para relacionar as anomalias com o período correspondente aos dados de vazão obtidos no site da Agência Nacional de Águas (ANA) que possuíam série histórica de 1977 a 2008.

Os dados são calculados com base em anomalias de temperatura da superfície do mar de 1981 a 2010. São realizadas técnicas estatísticas de modelagem linear inversa para analisar sistemas dinâmicos lineares e não lineares, pois a exemplo do El Niño, essas anomalias são de natureza dinâmica estável podendo ser estimadas a partir de uma série temporal consolidada (Penland and Sardeshmukh, 1995; Penland and Magorian, 1993).

O modelo de previsão foi validado utilizando quatro períodos de verificação com intervalos de dez anos (entre 1970 a 2010) a partir de uma técnica de reamostragem conhecida como *Jackknifing* (ESRL/NOAA, 2016).

O ENOS é caracterizado por anomalias positivas e negativas de temperatura da superfície do mar no pacífico equatorial (CPTEC/INPE, 2016). Costuma-se caracterizar as anomalias através de índices que medem a média de TSM em diferentes áreas do pacífico. Os principais índices que identificam o ENOS são: Niño 1+2; Niño 3; Niño 3.4; Niño 4 (figura 5.2).

Os efeitos desta anomalia sobre o território brasileiro são perceptíveis, pois durante o fenômeno de aquecimento anormal das águas do oceano Pacífico Equatorial o clima sobre a amazônia torna-se mais seco acarretando em menor precipitação sobre a região e o Nordeste sofre com secas severas. Quando o fenômeno se inverte, diminuição anormal da temperatura média das águas do oceano Pacífico Equatorial, na região amazônica ocorre um aumento da

precipitação e vazão dos rios e no Nordeste ocorrem mais precipitações (CPTEC/INPE, 2016).

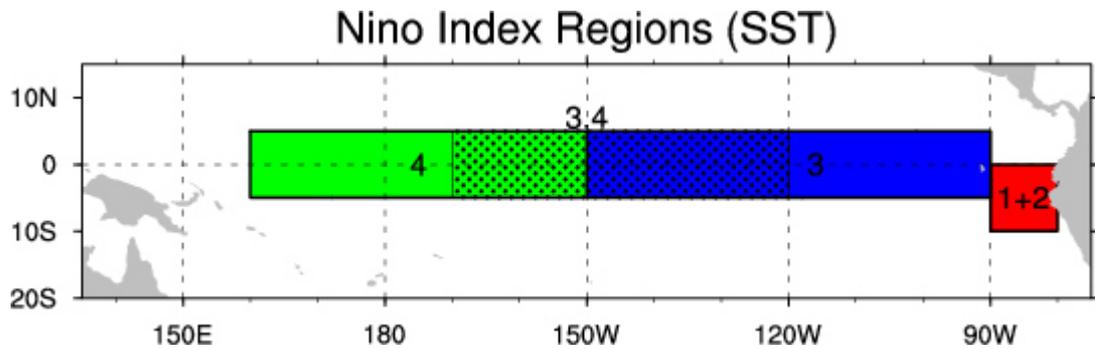


Figura 5.2: Área dos índices de temperatura da superfície do mar para El Niño (Fonte: Trenberth & NCARS, 2016).

Os dados baixados do ENOS são referentes ao índice Niño 1+2, pois nesta área ocorrem as maiores variações de temperatura da superfície do mar apesar de a área ser menor em relação aos demais índices Niño (Trenberth, & NCARS, 2016).

O índice North Tropical Atlântic (NTA) e o South Tropical Atlantic (STA) são importantes para determinar a posição da Zona de Convergência Intertropical, responsável pela grande quantidade de precipitações na região Nordeste e na Costa Norte do Brasil. Contudo, utilizamos apenas os dados NTA por apresentarem um modelo de previsão testado (figura 5.3).

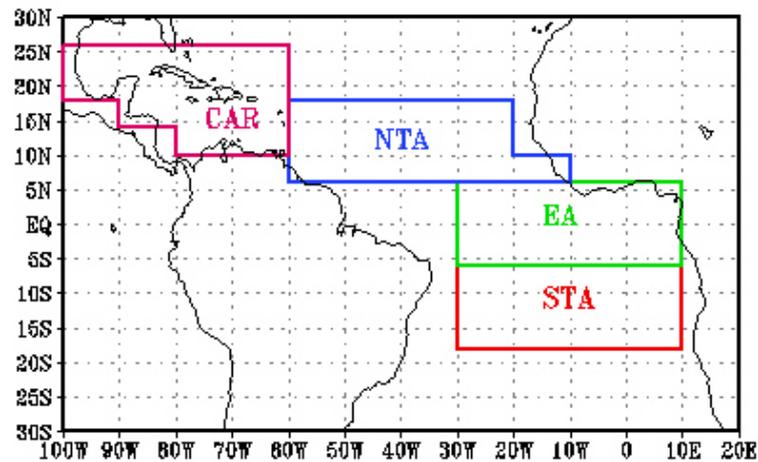


Figura 5.3: Área dos índices de temperatura da superfície do mar para o oceano Atlântico Norte, Equatorial, Sul e mar do Caribe (Fonte: ESRL/NOAA, 2016).

5.3- RESULTADOS E DISCUSSÃO.

A seguir serão apresentados os resultados dos valores médios anuais de TSM para a área do NIÑO 1+2 e NTA.

A tabela 5.1 apresenta os valores médios anuais de anomalia de TSM para o oceano Pacífico e Atlântico.

Tabela 5.1: Anomalias de temperatura da superfície do mar nas áreas dos índices Niño 1+2 e North Tropical Atlantic.

| ANO | NINO 1+2 (ANOMALIA EM °C) | NTA (ANOMALIA EM °C) |
|------|---------------------------|----------------------|
| 1977 | 0,26 | -0,38 |
| 1978 | -0,51 | -0,22 |
| 1979 | 0,01 | 0,01 |
| 1980 | 0,25 | 0,05 |
| 1981 | -0,33 | -0,05 |
| 1982 | -0,26 | -0,33 |
| 1983 | 2,73 | 0,04 |
| 1984 | 0,25 | -0,31 |
| 1985 | -0,72 | -0,47 |
| 1986 | -0,51 | -0,56 |
| 1987 | 0,85 | 0,17 |
| 1988 | 0,00 | 0,01 |
| 1989 | -0,66 | -0,31 |
| 1990 | -0,36 | 0,02 |
| 1991 | -0,11 | -0,37 |

| | | |
|------|-------|-------|
| 1992 | 0,84 | -0,27 |
| 1993 | 0,24 | -0,26 |
| 1994 | -0,33 | -0,40 |
| 1995 | -0,09 | 0,23 |
| 1996 | -0,85 | 0,12 |
| 1997 | 0,61 | 0,16 |
| 1998 | 3,18 | 0,39 |
| 1999 | -0,37 | -0,13 |
| 2000 | -0,62 | -0,21 |
| 2001 | -0,29 | 0,08 |
| 2002 | -0,25 | 0,06 |
| 2003 | -0,43 | 0,19 |
| 2004 | -0,35 | 0,34 |
| 2005 | -0,25 | 0,52 |
| 2006 | -0,39 | 0,34 |
| 2007 | -0,34 | 0,14 |
| 2008 | -0,33 | 0,12 |

A figura 5.4 mostra o comportamento da anomalia de temperatura nos oceanos Pacífico Equatorial Sul e Atlântico Tropical Norte entre 1977 a 2008.

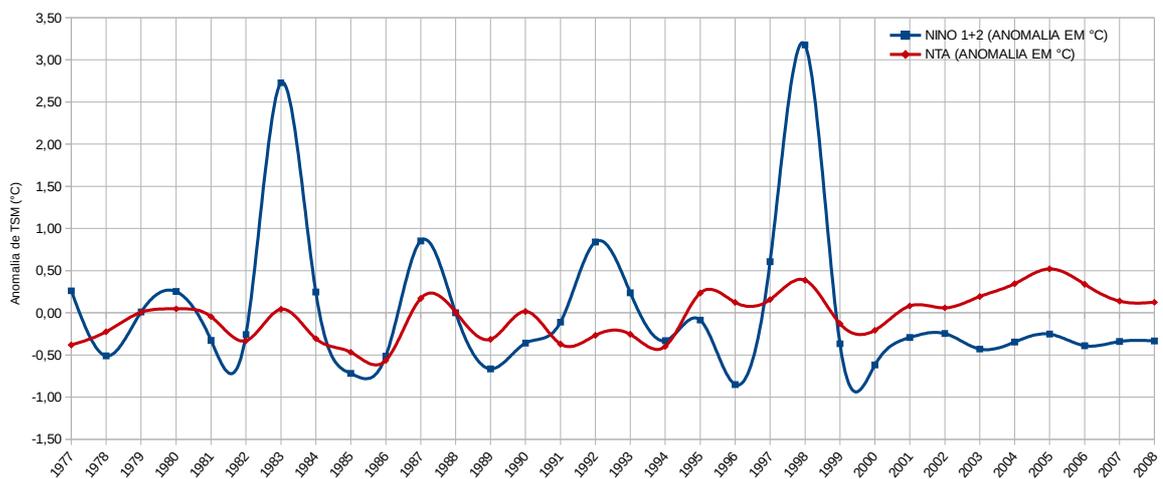


Figura 5.4: Variações da anomalia da TSM nas áreas dos índices Niño 1+2 e North Tropical Atlantic de 1977 a 2008.

Podemos identificar na figura 5.4 que as anomalias de TSM no Pacífico possuem maior variação em relação as do Atlântico. A área do índice Niño 1+2 é aproximadamente 1.237.288 km² e a do índice NTA é igual a 6.573.878 km². A área do Niño 1+2 é 5,3 vezes menor em relação a área do North Tropical Atlantic. Apesar de menor, as anomalias são bastante expressivas como podemos identificar no gráfico. Em 1983 e 1998 as temperaturas da superfície do mar subiram em média 2,73 °C e 3,18 °C no Pacífico. Essas alterações refletiram na amazônia deixando a região mais seca (redução da precipitação e vazão dos rios).

Na figura 5.5 identificamos anomalias de temperatura muito altas (El Niño) nos anos de 1983 e 1998. Nesses anos identificamos a menor vazão, consequentemente menor precipitação, nos rios analisados. Quando as anomalias de temperatura no oceano pacífico atingem valores abaixo do normal (La Niña) ocorrem as maiores vazões, maiores precipitações, nos rios estudados. Os valores negativos de anomalia nos anos de 1989 e 1996 correspondem as maiores vazões observadas a partir dos dados médios. A partir de 2000 as anomalias de temperatura no Pacífico se mantém abaixo da média, ou seja, isso caracteriza uma série temporal influenciada pelo fenômeno La Niña. Percebemos que ocorreu um aumento da precipitação/vazão nas sub-bacias dos rios Araguari, Gurupi e Pindaré nos últimos anos.

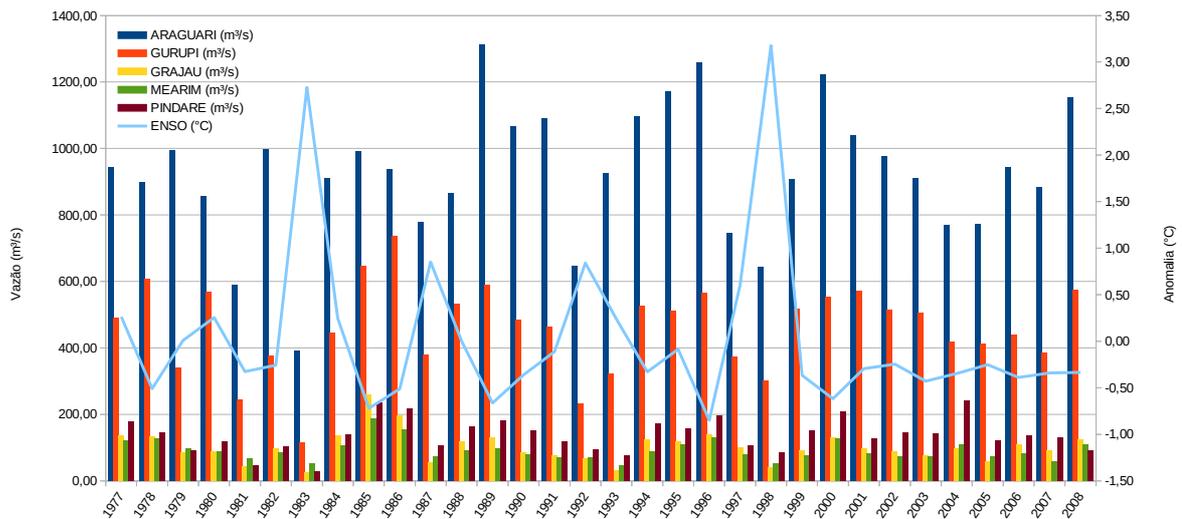


Figura 5.5: Comparação das vazões anuais médias dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim com as anomalias de TSM no Pacífico Equatorial Sul.

Os reflexos do El Niño de 1997/1998 (elevação da temperatura do mar) atingiram o extremo sul do Brasil, afetado por excesso de precipitação durante a primavera e verão, o Nordeste do Brasil e Leste da Amazônia pela diminuição da precipitação principalmente durante a estação chuvosa de fevereiro a maio do semiárido (Ropelewski & Halpert, 1989).

A figura 5.6 mostra a relação da anomalia da TSM no oceano Atlântico Norte com as vazões dos rios analisados. Há uma tendência de aumento da temperatura no oceano Atlântico e diminuição da vazão nos rios Grajaú e Mearim. Nos anos de 1985, 1989, 1996 e 2000 ocorreram as maiores vazões nos rios Grajaú e Mearim. Esse aumento coincide com a diminuição da TSM da área do índice NTA.

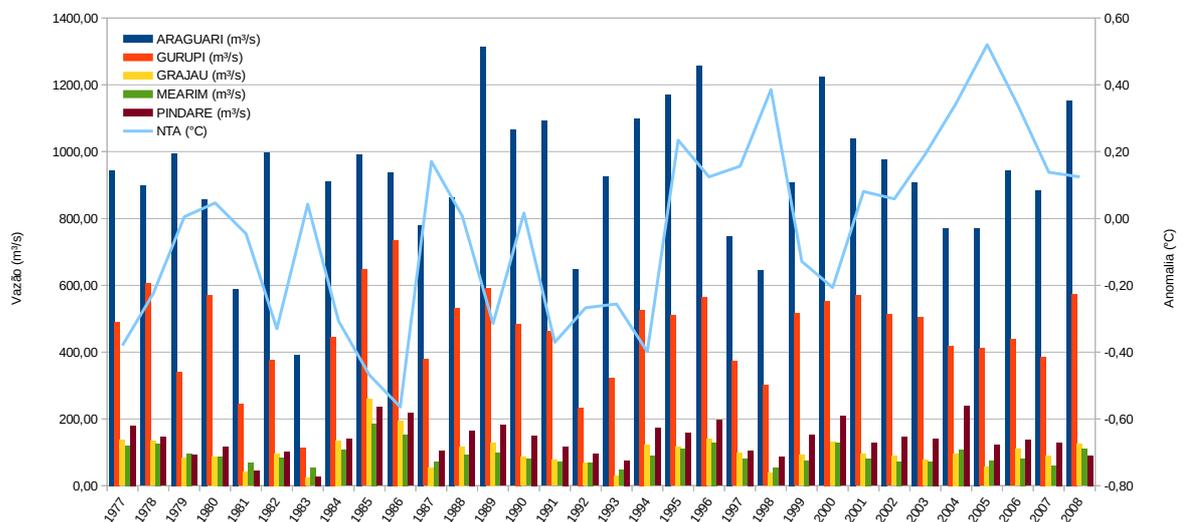


Figura 5.6: Comparação das vazões anuais médias dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim com as anomalias de TSM no Atlântico Norte.

A tabela 5.2 mostra a correlação e o coeficiente de determinação dos dados anuais de vazão nas sub-bacias com as anomalias de temperatura do mar no oceano Pacífico e Atlântico.

Tabela 5.2: Correlação entre as vazões nos rios e as anomalias de TSM no Pacífico Equatorial Sul e Atlântico Norte durante 31 anos (1977 - 2008) e a cada 15 anos (1977 - 1992 e 1993 - 2008).

| SUB-BACIA | NINO 1+2 (1977-2008) | NINO 1+2 (1977-1992) | NINO 1+2 (1993-2008) | NTA (1977-2008) | NTA (1977-1992) | NTA (1993-2008) |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| ARAGUARI | -0,68 | -0,75 | -0,61 | -0,27 | -0,42 | -0,48 |
| GURUPI | -0,66 | -0,72 | -0,66 | -0,30 | -0,50 | -0,31 |
| PINDARÉ | -0,58 | -0,64 | -0,51 | -0,25 | -0,62 | -0,10 |
| GRAJAU | -0,54 | -0,60 | -0,59 | -0,48 | -0,71 | -0,22 |
| MEARIM | -0,49 | -0,54 | -0,50 | -0,42 | -0,65 | -0,06 |

Analisando os valores de 1977 a 2008, identificamos correlação moderada negativa entre as anomalias de TSM no Pacífico com as vazões nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré e Grajaú. Apresenta também uma correlação entre moderada e fraca para a vazão no rio Mearim. Isso indica uma relação de proporcionalmente inversa entre a precipitação e as temperaturas da superfície do mar no Pacífico.

Ao analisar a série temporal a cada 15 anos (de 1977 a 1992 e de 1993 a 2008) a correlação aumenta para todos os rios. Isso indica que possivelmente o fenômeno El Niño/La Niña exerceram uma influência significativa de 1977 a 1992 e continuaram agindo de forma moderada de 1993 a 2008. O fenômeno El Niño/La Niña pode representar uma importante vetor de influência atmosférica que age sobre a precipitação na Costa Norte brasileira.

O coeficiente de determinação indica que o ENOS possui 46% de influência sobre os fenômenos de precipitação na sub-bacia do rio Araguari e 44% na sub-bacia do rio Gurupi. Essa porcentagem cai em relação as sub-bacias dos rios Pindaré, Grajaú e Mearim que podem estar recebendo uma influência maior de outros Eventos atmosféricos como a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) que também interfere nas chuvas da região nordeste do Brasil.

Ao falar em ZCIT, podemos analisar a correlação das vazões dos rios com as anomalias de temperatura do mar no oceano Atlântico Norte (índice NTA). Essas variações de temperatura causam efeito na oscilação da ZCIT. Geralmente a ZCIT está situada sobre ou próximo as altas temperaturas do mar, ou seja, quando a temperatura no oceano Atlântico Norte fica mais fria em relação ao Atlântico Sul, ocorrem mais precipitações sobre o Nordeste e quando fica mais quente as águas do Atlântico Norte o litoral do Nordeste recebe menos precipitações que se deslocam para latitudes superiores a linha do equador (Nobre & Molion, 1986).

É importante compreender esse mecanismo, pois as sub-bacias dos rios Grajaú e Mearim estão em uma zona de transição de biomas (entre o bioma Amazônia e Cerrado). Portanto, as precipitações da ZCIT no Nordeste do Brasil podem ser efeito maior das precipitações causadas pelo aquecimento das águas do Atlântico.

Analisando na tabela 5.2 os valores de correlação de 1977 a 2008 são maiores para as sub-bacias na transição de biomas (Grajaú e Mearim) que as pertencentes ao bioma Amazônia (Araguari, Gurupi e Pindaré). Durante 1977 e 1992 identificamos as maiores correlações para as sub-bacias do Grajaú, Mearim e Pindaré.

A figura 5.7 identifica a vazão nos rios Araguari, Gurupi e Pindaré. A área da sub-bacia destes rios estão situadas no domínio Amazônico, ou seja, estão sujeitas as variações climatológicas da Amazônia. A linha de tendência indica um aumento na precipitação/vazão nessas áreas que podem estar associadas com as anomalias de TSM no Pacífico de 200 a 2008. A vazão entre os rios Araguari e Gurupi apresentam correlação 0,71 e entre o Gurupi e Pindaré é de 0,75. Os três rios podem estar sob influência de um mesmo fenômeno atmosférico.

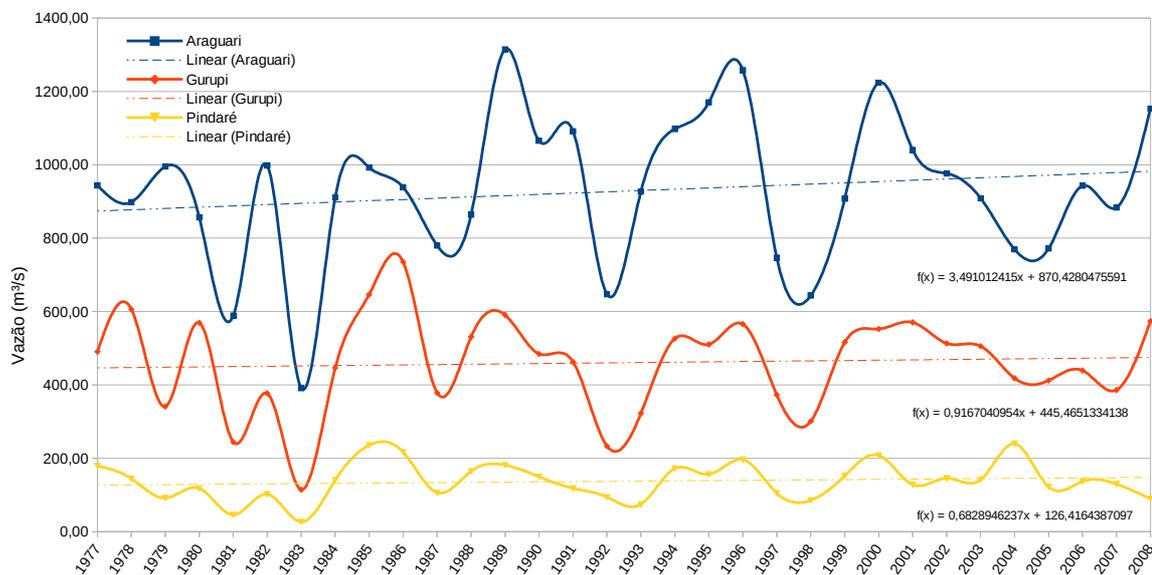


Figura 5.7: Representação da tendência das vazões nos rios Araguari, Gurupi e Pindaré de 1977 a 2008.

A figura 5.8 indica uma tendência contrária da vazão nos rios Grajaú e Mearim. Pode estar associado a este fato a influência da ZCIT durante o período de 1977 a 1992. As

anomalias de TSM do Atlântico apresentaram correlações representativas com a vazão nos rios Grajaú (-0,72) e Mearim (-0,65). De 1995 a 2008 percebemos um aumento da temperatura média anual no Atlântico Norte. Esse aumento da TSM pode influenciar no deslocamento da ZCIT para o hemisfério Norte provocando precipitações mais fortes acima da linha do equador e gerando menos precipitação no Nordeste do Brasil. As sub-bacias dos rios Grajaú e Mearim estão em zona de transição de biomas e podem estar recebendo precipitações em menor quantidade por influência da anomalia de TSM no Pacífico Sul em relação as anomalias do oceano Atlântico Norte.

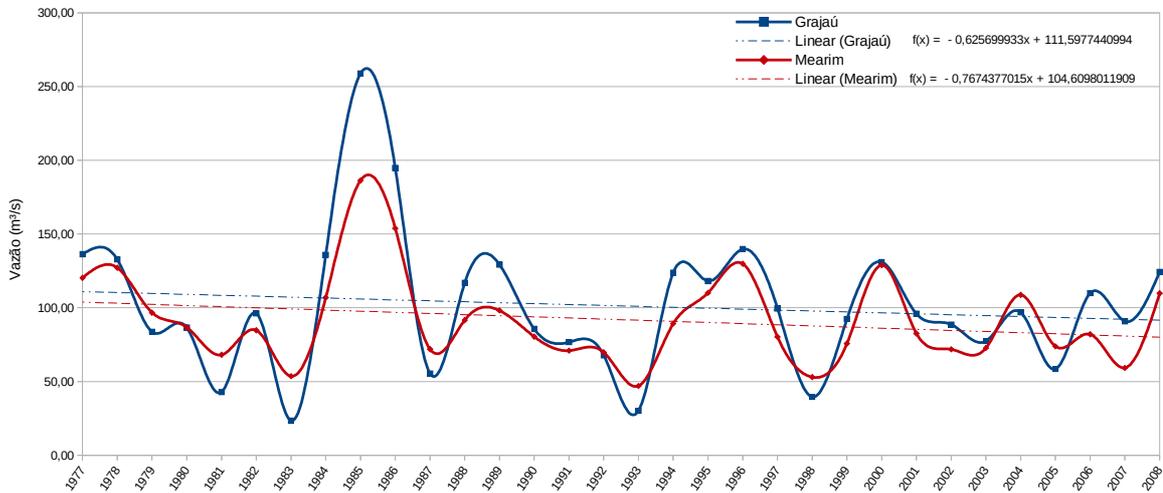


Figura 5.8: Representação da tendência das vazões nos rios Grajaú e Mearim de 1977 a 2008.

5.5- CONCLUSÕES.

Os resultados mostram que as anomalias de temperatura da superfície do mar na região de medição dos índices El Niño 1+2 e Atlântico Tropical Norte possuem relação com o regime de precipitação/vazão nas sub-bacias dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim.

Os rios presentes no bioma Amazônia (Araguari, Gurupi e Pindaré) apresentaram maiores correlações com as anomalias de TSM no oceano Pacífico Equatorial Sul. Enquanto, os rios presentes em áreas de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado (Grajaú e Mearim) apresentaram correlação maior com as anomalias de TSM do oceano Atlântico

Tropical Norte. A relação entre as precipitações/vazões e anomalias de temperatura são inversas, ou seja, quando ocorre o aumento da temperatura da superfície do mar a precipitação/vazão nas sub-bacias dos rios diminui e vice-versa.

Observamos uma tendência de aumento de precipitação/vazão nos rios Araguari, Gurupi e Pindaré possivelmente relacionado com a diminuição da temperatura média no oceano Pacífico Equatorial Sul nos últimos anos (de 1999 a 2008). Por outro lado, identificamos uma tendência a diminuição da precipitação/vazão nos rios Grajaú e Mearim possivelmente relacionada com o aumento da temperatura média das águas no oceano Atlântico Tropical Norte nos últimos anos (de 2001 a 2008).

Conseguimos identificar a influência da TSM do Pacífico Equatorial Sul e Atlântico Tropical Norte no regime de precipitação/vazão na zona costeira amazônica. Sabemos que não podemos creditar unicamente as anomalias de temperatura da superfície do oceano a totalidade dos fenômenos hidrológicos na região costeira amazônica, pois a atmosfera é complexa, resultado da interação de múltiplas variáveis (Umidade, Ventos, temperatura do ar, sistema de convecção, tipo de cobertura da superfície terrestre, etc.). Contudo, podemos perceber a importância da TSM no resultado do tempo meteorológico na região estudada.

CAPÍTULO 6: MUDANÇA NA COBERTURA E USO DA TERRA NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DE RIOS AMAZÔNICOS E SUA RELAÇÃO COM A CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO.

6.1- INTRODUÇÃO.

As relações entre sociedade e natureza refletem a forma como a humanidade produz seus objetos essenciais para a formação social. A humanidade transforma ou produz espaços vivendo em sociedade. Essa transformação do espaço é visível na costa amazônica que é submetida à diversas pressões antrópicas devido à exploração e ocupação humana (Menezes et al., 2008). De acordo com Szlafsztein (2005), as áreas costeiras são atraentes para o progresso humano levando em consideração o aumento da população e o desenvolvimento da infra-estrutura regional.

O homem pode influenciar consideravelmente o processo de sedimentação natural através de suas atividades econômicas podendo ser benéfica ou danosa para o meio ambiente e para si próprio.

A erosão é um dos resultados gerados pelas atividades humanas que pode causar sérios danos nas terras agrícolas através da redução da fertilidade e produtividade do solo, bem como na morfologia da rede de drenagem que compõem uma bacia hidrográfica. Assim, os fenômenos erosivos causados pela ocupação inadequada do solo geram graves consequências como a redução da fertilidade dos solos, assoreamento de cursos de água, enchentes, voçorocas, entre outros (Vieira, 2008).

De acordo com Carvalho (2008), o crescimento demográfico implica em uma maior necessidade de produção de alimentos levando à incorporação de novas áreas agrícolas, crescimento urbano, desmatamento e outras obras de infraestrutura.

Os processos sedimentológicos que ocorrem na natureza têm sido acelerados e intensificados pela ação do homem. Dentre as principais atividades destaca-se o uso inadequado do solo, o desmatamento, a urbanização, atividade agropecuária e alteração dos cursos dos rios (Brito et al., 2009).

Press et al. (2006) estimou que a descarga sólida de todos os rios do planeta poderia chegar a 16 bilhões de toneladas anuais e grande parcela desta carga é associada a ação antrópica, pois antes do surgimento da humanidade, a descarga de sedimentos variava em torno de 9 bilhões de toneladas.

O conhecimento da concentração de sólidos totais em suspensão (massa de sedimento em suspensão na água por unidade de massa da mistura por unidade de volume) é importante para avaliarmos as consequências da intervenção antrópica nas bacias hidrográficas (erosão devido ao desmatamento, atividades agrícolas ou mineração) (Viers et al., 2009).

Carvalho (1995) destacou um diagnóstico sedimentológico realizado na bacia do rio São Francisco. Este levantamento mostrou que o aumento da produção de sedimentos estava sendo causado pela urbanização e mineração na área da bacia, também pelo aumento de áreas agrícolas e construção de estradas, associadas com o aumento de precipitações.

Com a ocorrência de uma chuva, a água que atinge o solo possui dois caminhos a realizar: infiltrar no solo ou escoar superficialmente a ele. A quantidade de água que infiltra ou escoar dependerá da intensidade da precipitação. As chuvas mais intensas e duradouras provocam maior erosão dos solos, pois excedem a capacidade de infiltração ou saturam o solo rapidamente resultando no escoamento superficial (Botelho & Silva, 2004).

Os solos de florestas possuem maior capacidade de infiltração que os solos expostos, que tendem a ser mais compactados e saturam de água mais rápido facilitando o escoamento superficial. O escoamento superficial aumenta significativamente o volume de água nos rios durante eventos chuvosos e pode influenciar na perda de solo por erosão. A elevada capacidade de transporte da água pode levar ao carreamento de toneladas de sedimentos para os canais fluviais. Isso acarreta na redução da fertilidade dos solos, assoreamento dos rios e inundações de áreas topograficamente mais próximas do nível d'água (Botelho & Silva, 2004).

Dentre os fatores que interferem no processo erosivo podemos citar: energia cinemática da água da chuva, propriedades químicas e físicas dos solos, comprimento, forma e declividade de encostas, cobertura vegetal, uso e manejo do solo (Guerra & Mendonça, 2004).

Dessa forma, o objetivo deste capítulo é analisar a relação entre as variações de sedimentos totais em suspensão e a mudança de cobertura e uso da terra por atividades de desmatamento, agricultura e mineração nas sub-bacias hidrográficas amazônicas dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim. Acredita-se que os impactos antrópicos sobre a cobertura vegetal, através do desmatamento e atividades de mineração e agricultura, podem estar influenciando nas variações de concentração de sedimentos totais em suspensão nos rios amazônicos.

6.2- MATERIAIS E MÉTODOS.

Para realização desta etapa da pesquisa, realizou-se a classificação da cobertura e uso do solo nas sub-bacias dos rios Araguari, Gurupí, Pindaré, Grajaú e Mearim (1). Na sequência extraiu-se a rede de drenagem nas sub-bacias e aplicou-se um buffer com distância de 500 metros desta drenagem (2) para calcular o desmatamento e a cobertura e uso do solo nas margens dos rios. Foi realizada a correlação dos dados médios de Css, apresentados no capítulo 4, com os dados do desmatamento do Prodes (3) e dados de produção mineral da ICOMI (4) e Produção da orizicultura no Maranhão (5). O fluxograma abaixo resume as etapas da pesquisa (Figura 6.1).

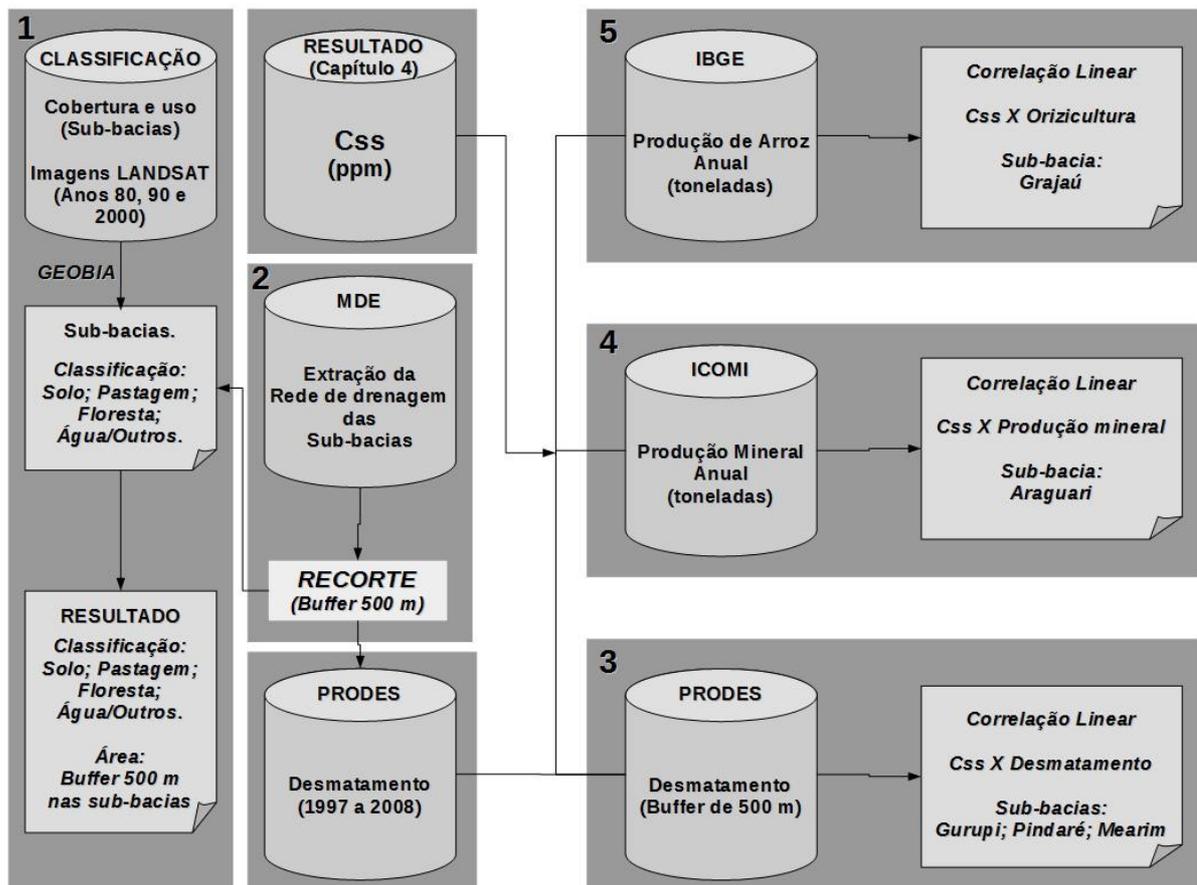


Figura 6.1: Fluxograma sintetizando os passos realizados no capítulo 6.

6.2.1- Dados anuais de concentração de sedimentos em suspensão.

Utilizamos os dados médios anuais de concentração de sedimentos em suspensão (Css) apresentados como resultado no capítulo 4. Os dados não estão completos para todas as estações de coletas como demonstrado na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Série temporal de dados anuais médios da concentração de sedimentos em suspensão obtidos nas estações de sedimentos da Agência Nacional de Águas.

| ESTAÇÃO / RIO | DADOS ANUAIS EM SÉRIE |
|-------------------------|------------------------------|
| PORTO PLATON / ARAGUARI | 1977 a 2008 |
| ALTO BONITO/ GURUPI | 1995 a 2008 |
| PINDARÉ-MIRIM / PINDARÉ | 1992 a 2008 |
| ARATOI GRANDE / GRAJAÚ | 1993 a 2008 |
| PEDREIRAS II / MEARIM | 1982 a 2008 |

6.2.2- Extração automática da rede de drenagem e delimitação da região de interesse (buffer de 500 metros).

Foi realizada a extração automática da rede de drenagem a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) do Shuttle Radar Topography Mission com resolução espacial de 30 metros, a partir do uso do software Global Mapper versão 16. Dessa forma foi possível delimitar as sub-bacias hidrográficas dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim e por conseguinte analisar a dinâmica da cobertura e uso da terra nas referidas bacias.

Os arquivos da rede de drenagem gerados no Global Mapper foram salvos em formato shapefile para posterior geração de uma delimitação ou buffer de 500 metros ao entorno dos vetores que representam os rios. Essa delimitação é importante para avaliar o desmatamento do Prodes e a classificação da cobertura do solo nas margens das drenagens.

6.2.3- Dados de desmatamento PRODES.

Utilizou-se dados de desmatamento do PRODES (Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite). Este projeto produz desde 1988 as taxas anuais de desmatamento na Amazônia para uso em políticas públicas pelo governo (OBT/INPE, 2016). São utilizadas imagens de satélite LANDSAT com resolução de 30

metros. Os dados foram adquiridos no endereço “<http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodes.php>” em formato vetorial digital. A informação sobre o desmatamento para os arquivos digitais estão disponíveis de 1997 a 2016. Porém só utilizaremos a série temporal de 1997 a 2008 devido a limitação da metodologia de nossa pesquisa, pois realizamos o mapeamento dos manguezais até o ano de 2008.

Os dados do PRODES representam a remoção da cobertura vegetal em um curto espaço de tempo (dados anuais) que é substituída por outras coberturas e usos (agrícola, pastagem, urbano, hidroelétricas, etc.). Os dados digitais de desmatamento não diferenciam as coberturas e usos.

6.2.4- Classificação da cobertura do solo.

Diante da limitação dos dados do PRODES, foram utilizadas imagens LANDSAT TM para classificar o uso e cobertura do solo nas sub-bacias dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim. Foram selecionadas 36 imagens para auxiliar na classificação das três décadas (1980; 1990 e 2000) e identificar as mudanças na cobertura solo com base na análise de 4 categorias: Água/Outros; Floresta Nativa; Pastagem; Solo Exposto.

Tabela 6.2: Imagens LANDSAT utilizadas para a classificação da cobertura do solo nas sub-bacias dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim.

| SUB-BACIA | ORBITA/PONTO | DATA DAS CENAS |
|-----------------------|--------------|------------------------------------|
| Araguari | 226/60 | 11/07/1988 |
| Araguari | 227/59 | ----- |
| Araguari | 225/59 | 26/08/1984 |
| Araguari | 226/59 | 04/08/1985; 28/01/1995; 24/05/2007 |
| Araguari | 226/58 | 23/08/1986 |
| Gurupi | 222/61 | 27/08/1986; 06/08/1995; 20/06/2008 |
| Gurupi/Pindaré | 222/62 | 27/08/1986; 05/07/1996; 20/06/2008 |
| Gurupi/Pindaré | 222/63 | 10/07/1986; 03/06/1996; 26/10/2008 |
| Gurupi/Pindaré | 222/64 | 10/07/1986; 05/07/1996; 26/10/2008 |
| Pindaré/Grajaú/Mearim | 221/62 | 17/06/1986; 16/10/1995; 24/06/2006 |
| Pindaré/Grajaú/Mearim | 221/63 | 01/08/1985; 30/05/1997; 24/06/2006 |

| | | |
|-----------------------|--------|------------------------------------|
| Pindaré/Grajaú/Mearim | 221/64 | 04/08/1986; 16/10/1995; 29/06/2006 |
| Grajaú/Mearim | 221/65 | 04/08/1986; 12/07/1995; 15/07/2006 |
| Mearim | 220/63 | 31/07/1987; 22/08/1995; 01/08/2006 |
| Mearim | 220/64 | 10/06/1986; 22/08/1995; 24/07/2006 |

As cenas foram adquiridas no site do USGS (<http://landsatlook.usgs.gov>) com pré-processamento de correção geométrica (ortoretificação) realizada. A correção atmosférica das cenas foi executada com o módulo ATCOR do software PCI Geomática. Foram selecionadas cenas com datas próximas dos anos de 1986, 1996 e 2008 com menor cobertura de nuvens. Foram utilizadas imagens de radar JERS-1 e ALOS/PALSAR para auxiliar a classificação da sub-bacia do rio Araguari, pois as imagens LANDSAT adquiridas para classificação da cobertura do solo não possuíam uma cobertura de nuvens baixa. Portanto, a sub-bacia do rio Araguari foi classificada na década de 1990 e 2000 com imagens de radar devido a limitação das imagens óticas que possibilitaram a classificação apenas da década de 1980.

Foram gerados mosaicos e posteriormente estes foram recortados de acordo com o limite definido para cada sub-bacia no software PCI Geomática. O objetivo deste processamento foi de limitar a classificação apenas a área de interesse.

Para classificar as imagens, utilizamos o software Ecognition 8 que utiliza a abordagem orientada ao objeto. Utilizamos a faixa espectral do infra-vermelho médio do LANDSAT 5 TM para separar as seguintes classes: Outros; Solo Exposto; Pastagem; Floresta Nativa (Tabela 6.3).

A banda espectral do infra-vermelho médio foi utilizado como faixa espectral padrão para classificação de todas as classes, pois ele apresentou um bom grau de separabilidade e possuir menor interferência atmosférica. A sequência de classificação apresentada na tabela 3 foi utilizada para as sub-bacias dos rios Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim. Na classificação da sub-bacia do rio Araguari foram utilizadas apenas imagens de radar e algumas cenas óticas do Landsat/TM 5. Devido à dificuldade em conseguir imagens do Amapá com pouca cobertura de nuvens, as imagens óticas utilizadas na classificação serviram de base para a edição visual da classificação do solo exposto.

Tabela 6.3: Árvore de classificação utilizada para identificar as classes Solo Exposto, Floresta Nativa, Pastagem e Água.

| PROCESSO | PROCESSO FILHO | ALGORITMO | FUNÇÃO/CONDIÇÃO |
|------------------------------|---|------------------------------|--|
| (1) SEGMENTAÇÃO | Segmentar | Multiresolution segmentation | *Parâmetro de escala= 10; *Peso igual para as bandas espectrais; *Forma=0.1/ Brilho=0.9/ Compacidade=0.5/ Suavidade=0.5 |
| (2) CLASSIFICAÇÃO | (2.1) Classificar classe Solo Exposto | classification | Média do Infra-Vermelho Médio entre 135 - 175 |
| | (2.2) Classificar classe Floresta Nativa | | Média do Infra-Vermelho Médio entre 30 - 80 |
| | (2.3) Classificar classe Água | | Média do Infra-Vermelho Médio entre 0 - 30 |
| | (2.4) Classificar classe Pastagem | | Média do Infra-Vermelho Médio entre 80 - 135 |
| (3) AGRUPAR | Agrupar segmentos das classes | Merge region | Agrupar Classes: Solo Exposto; Floresta Nativa; Água; Pastagem |
| (4) EXPORTAR | Exportar classes | Export Vectors | Exportar vetor das Classes: Solo Exposto; Floresta Nativa; Água; Pastagem |

6.3- RESULTADOS E DISCUSSÃO.

A seguir serão apresentados os dados organizados em cinco partes. Na primeira parte serão mostrados os dados médios de C_{ss} apresentados no capítulo 4, a área de desmatamento do PRODES nas adjacências das drenagens e a dinâmica da cobertura e uso do solo nas décadas de 1980, 1990 e 2000. Na segunda parte será analisada a relação entre as variações de C_{ss} dos rios com as áreas desmatadas ao entorno das drenagens a partir dos dados de desmatamento do PRODES. Na terceira parte será relacionado as variações de C_{ss} com dados de produção de mineração da ICOMI na bacia hidrográfica do Araguari. Na quarta parte será analisada a relação das variações de C_{ss} com a produção de orizicultura na bacia hidrográfica do Grajaú. Na quinta parte será apresentada uma revisão na literatura para compreender o processo de ocupação na Zona costeira amazônica a partir das atividades de desmatamento na Amazônia e a proposta para conter o desmatamento.

6.3.1- Apresentação dos dados de C_{ss}, desmatamento (PRODES) nas adjacências das drenagens e mapeamento de cobertura e uso do solo nas sub-bacias hidrográficas.

Os dados de concentração de sedimentos em suspensão já haviam sido apresentados no capítulo 4. Reapresentamos através da figura 6.2 o comportamento dos dados médios de C_{ss} nas sub-bacias em estudo. Percebe-se que os rios Pindaré, Grajaú e Mearim apresentaram médias de C_{ss} superiores aos rios Araguari e Gurupi.

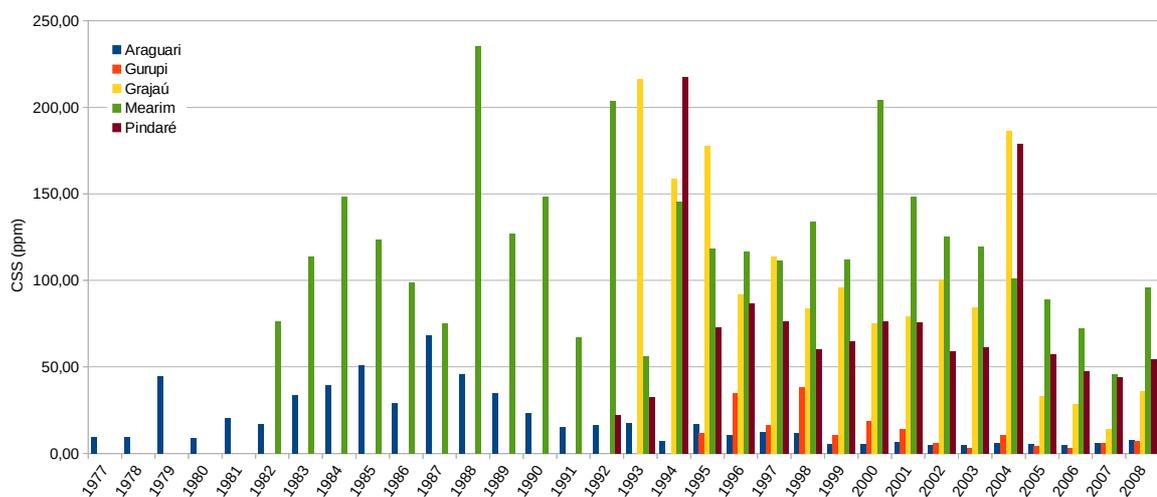


Figura 6.2: Média anual da concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) nos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim.

A rede de drenagem, gerada a partir de dados de elevação do SRTM, servirá para realizarmos uma análise da cobertura e do uso do solo nas margens dos rios classificadas como Áreas de Preservação Permanente (APP) de acordo com o disposto no inciso III, § 1º, do art. 225 da Constituição Federal (Ministério do Meio Ambiente, 2011).

O conceito oficial de APP relaciona essas áreas, independente da cobertura vegetal, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (MMA, 2011).

A tabela 6.4 apresenta os dados de desmatamento anual obtidos através de arquivo digital do PRODES. Os valores apresentados são referentes ao desmatamento nas margens dos rios obtidos através da extração automática de drenagem. Os dados digitais fornecem informações a partir de 1997, ano que apresenta a soma do desmatamento dos anos anteriores (1988 a 1997). Os dados de alguns anos não foram fornecidos no mapeamento do PRODES.

Tabela 6.4: Dados anuais de desmatamento do PRODES entre os anos de 1997 a 2008 nas sub-bacias hidrográficas dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim.

| ANO | ARAGUARI | GURUPI | PINDARE | GRAJAU | MEARIM |
|--------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1997 | 135,33 | 2478,01 | 4334,25 | 2337,85 | 2697,71 |
| 1998 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 1999 | ----- | 1405,36 | 322,93 | ----- | ----- |
| 2000 | ----- | 155,58 | 274,03 | 55,16 | 111,97 |
| 2001 | 22,28 | 487,48 | 885,79 | 34,57 | 113,90 |
| 2002 | ----- | 28,77 | 48,74 | 29,35 | 56,00 |
| 2003 | 11,54 | 34,50 | 16,12 | 2,47 | 44,66 |
| 2004 | 4,32 | 76,73 | 60,16 | 1,44 | 25,44 |
| 2005 | 0,45 | 61,52 | 48,67 | 4,28 | 42,98 |
| 2006 | 1,01 | 20,70 | 8,40 | 2,16 | 10,43 |
| 2007 | 2,76 | 9,06 | 20,60 | 9,59 | 31,44 |
| 2008 | 1,76 | 20,18 | 38,21 | 6,63 | 28,77 |
| TOTAL | 179,45 | 4777,89 | 6057,90 | 2483,48 | 3163,29 |

De acordo com os dados do PRODES, a sub-bacia mais impactada pelo desmatamento entre 1997 a 2008 foi a do rio Pindaré seguida pela sub-bacia do rio Gurupi.

A seguir será apresentado o mapeamento da cobertura e uso do solo nas sub-bacias dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim. Deve-se salientar que os resultados apresentados nas tabelas são referentes ao mapeamento de áreas até 500 metros dos rios (Figuras 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7).

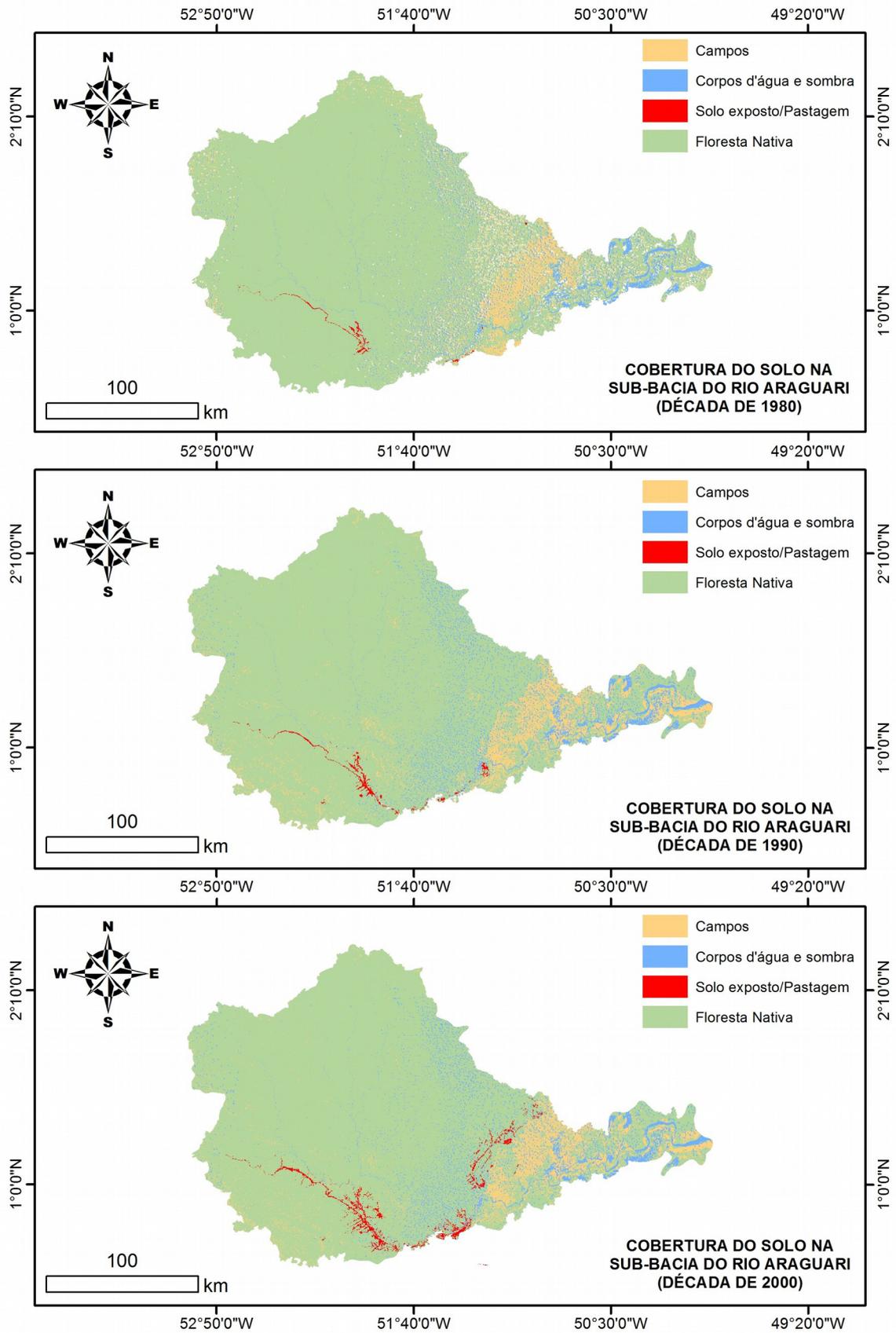


Figura 6.3: Classificação da cobertura e uso do solo na sub-bacia do rio Araguari.

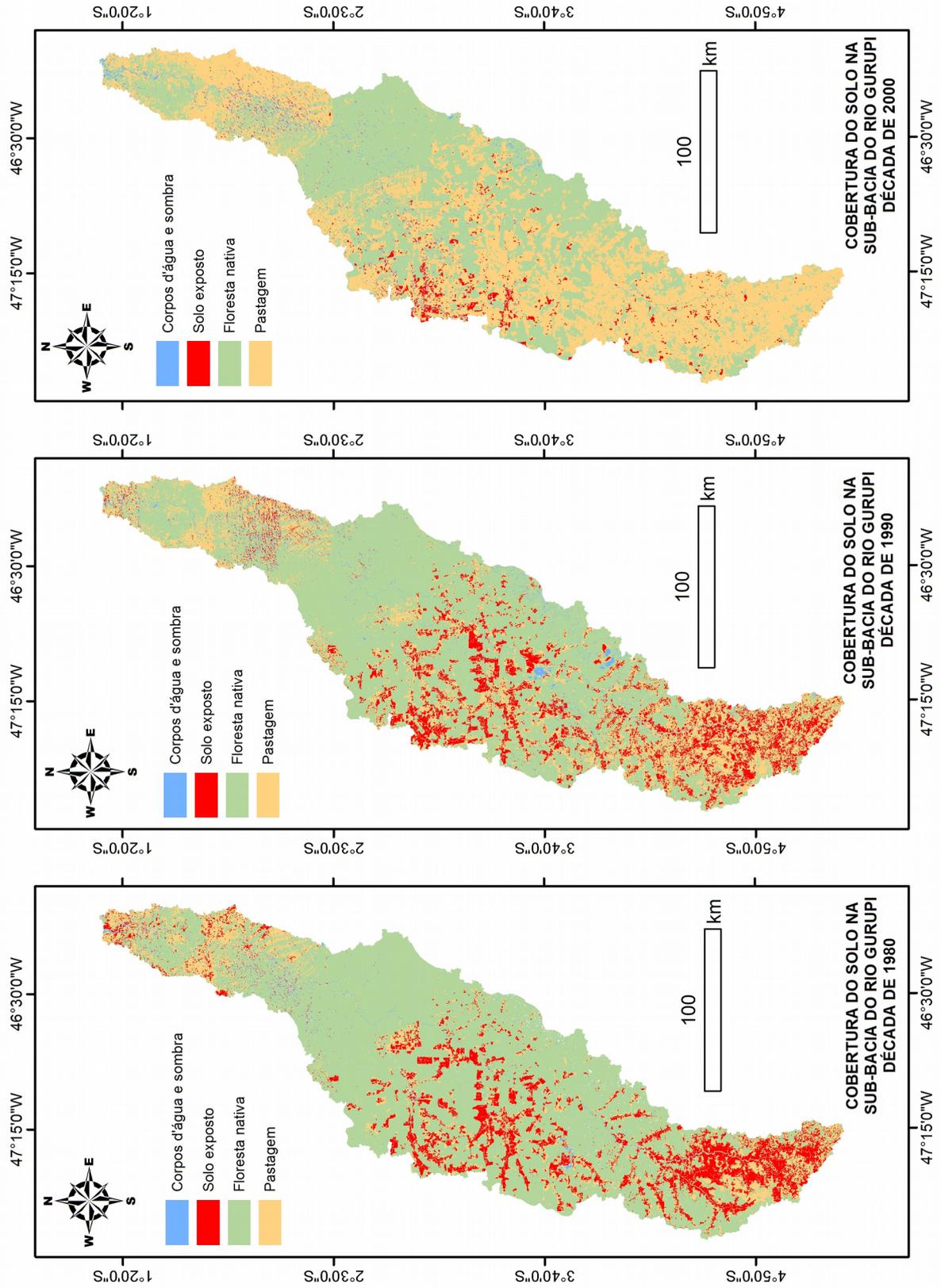


Figura 6.4: Classificação da cobertura e uso do solo na sub-bacia do rio Gurupi.

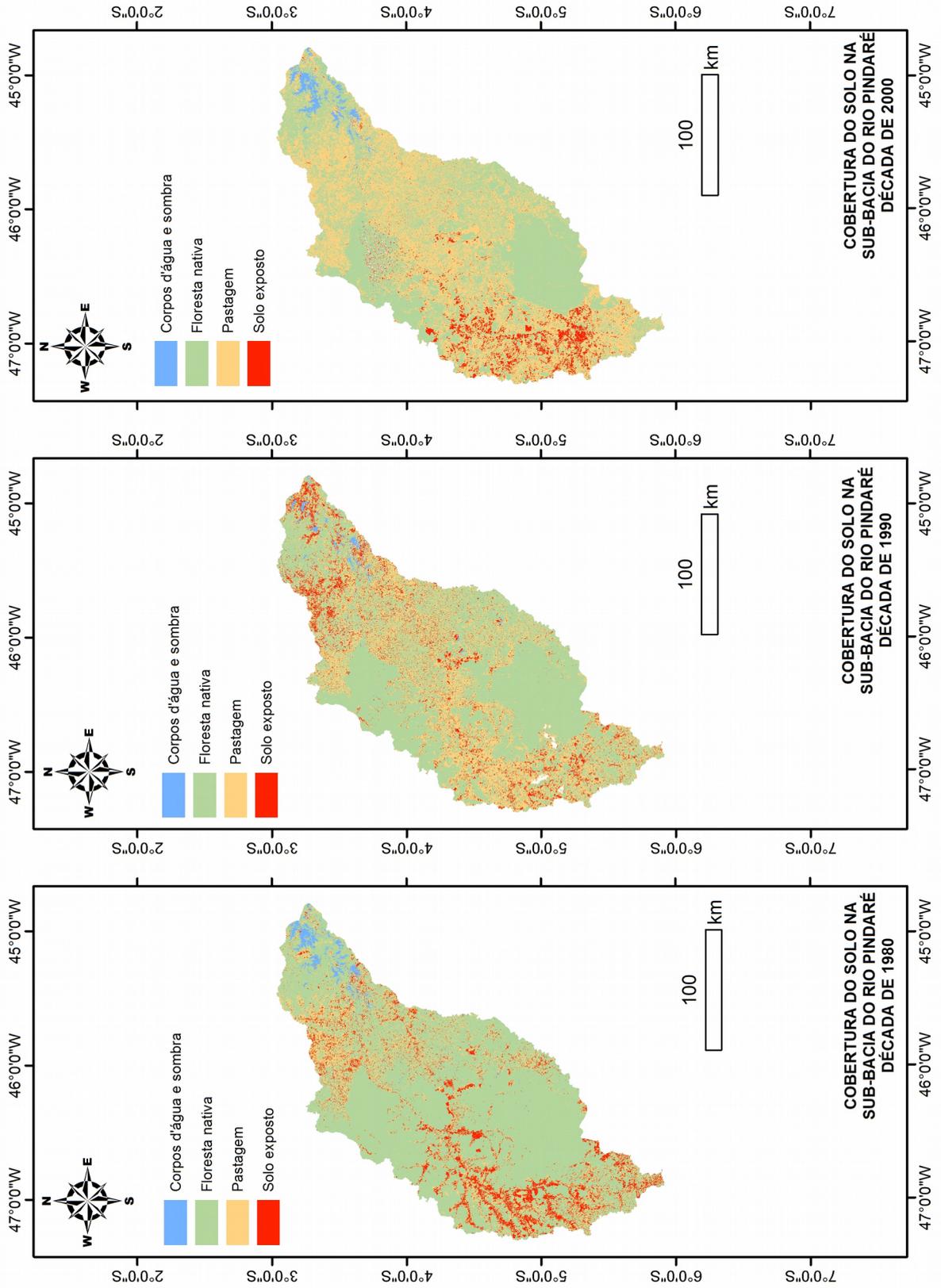


Figura 6.5: Classificação da cobertura e uso do solo na sub-bacia do rio Pindaré.

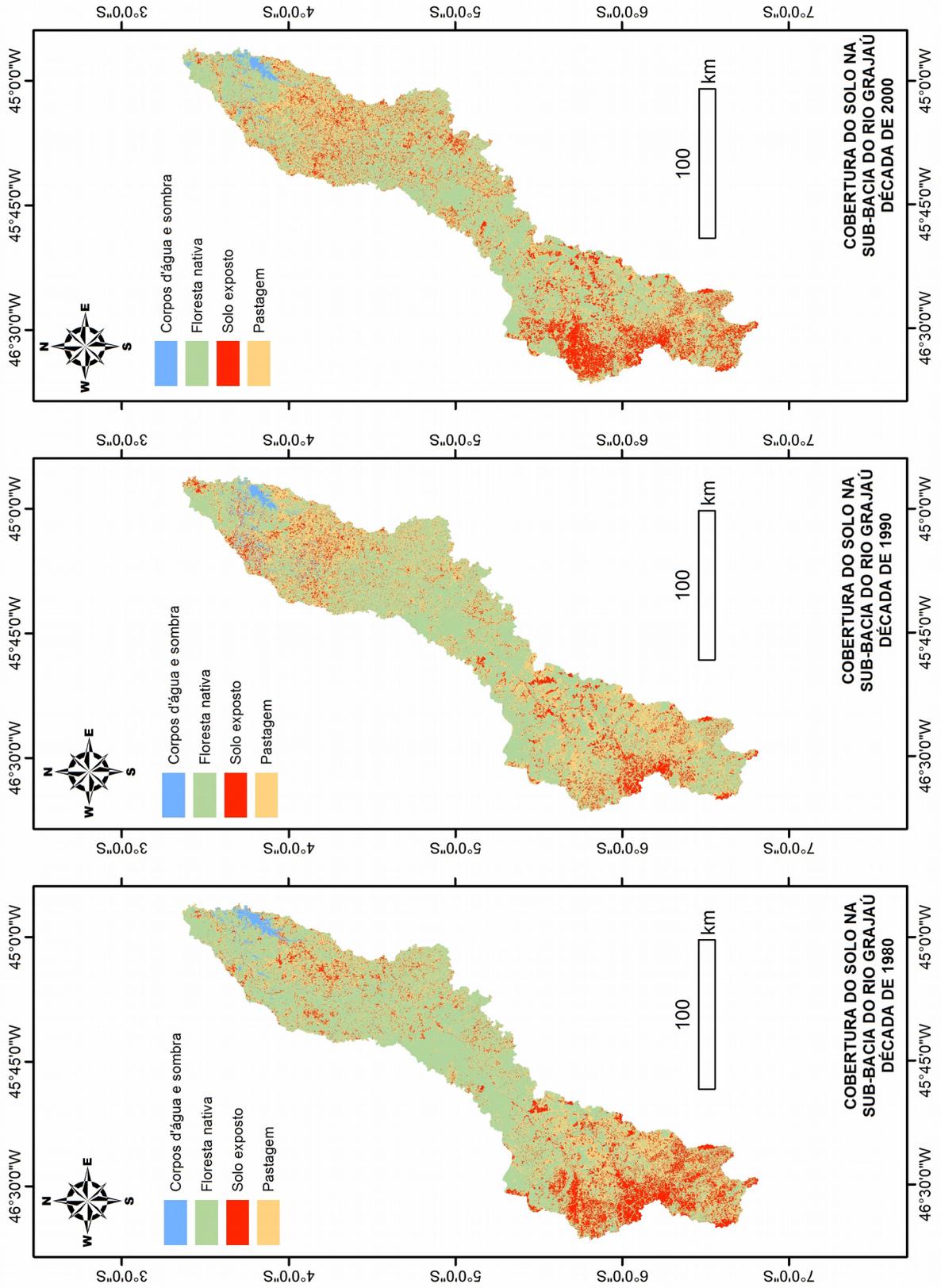


Figura 6.6: Classificação da cobertura e uso do solo na sub-bacia do rio Grajaú.

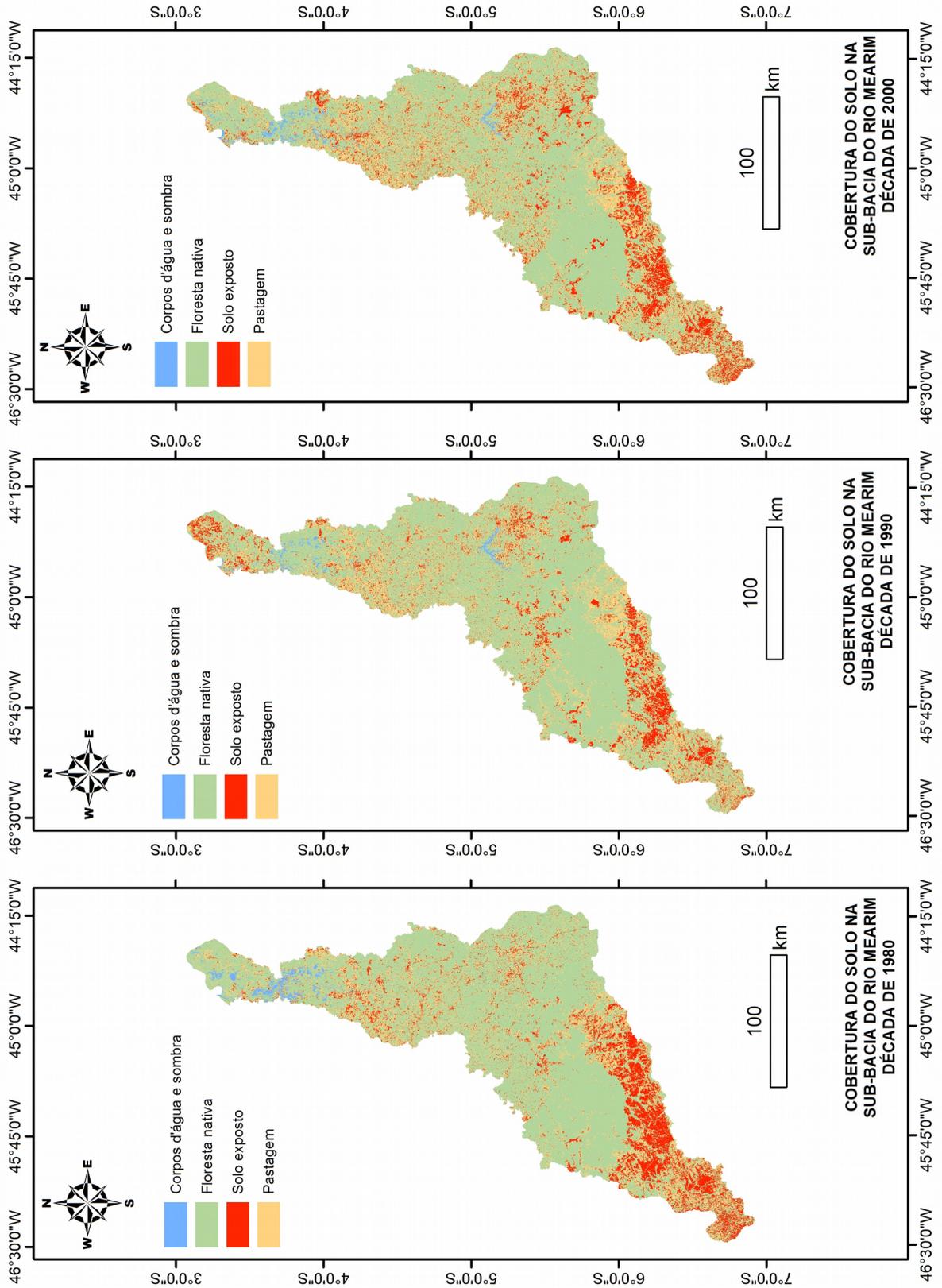


Figura 6.7: Classificação da cobertura e uso do solo na sub-bacia do rio Mearim.

Foram separadas as classes “Floresta Nativa”, “Solo Exposto”, “Pastagem” e “Outros” em todas as sub-bacias, com exceção da sub-bacia hidrográfica do Araguari onde a classe “Solo Exposto/Pastagem” agregou as duas classes. O procedimento para agregar as duas classes foi necessário diante da dificuldade em separar solo exposto de pastagem na sub-bacia do rio Araguari devido à quantidade de nuvens nas imagens LANDSAT no Amapá. Para delimitar a classe “Solo Exposto/Pastagem” utilizou-se as imagens SAR (JERS-1 e ALOS/PALSAR) para auxiliar a classificação nas décadas de 1990 e 2000 na sub-bacia do rio Araguari.

A tabela 6.5 resume a acurácia global e os índices Kappa obtidos na classificação das sub-bacias classificadas, cujos os coeficientes obtidos a partir da coleta de amostras no software eCognition.

Tabela 6.5: Acurácia Global e Índice Kappa referentes a classificação das sub-bacias nas décadas de 1980, 1990 e 2000.

| Classificação/Sub-bacia | Década | Acurácia Global | Índice Kappa |
|--------------------------------|---------------|------------------------|---------------------|
| Araguari | 1980 | 0,86 | 0,81 |
| Araguari | 1990 | 1 | 1 |
| Araguari | 2000 | 1 | 1 |
| Gurupi | 1980 | 0,9 | 0,85 |
| Gurupi | 1990 | 0,88 | 0,81 |
| Gurupi | 2000 | 0,98 | 0,97 |
| Pindaré | 1980 | 0,95 | 0,91 |
| Pindaré | 1990 | 0,96 | 0,93 |
| Pindaré | 2000 | 0,96 | 0,94 |
| Grajaú | 1980 | 0,94 | 0,9 |
| Grajaú | 1990 | 0,95 | 0,92 |
| Grajaú | 2000 | 0,96 | 0,94 |
| Mearim | 1980 | 0,93 | 0,9 |
| Mearim | 1990 | 0,91 | 0,89 |
| Mearim | 2000 | 0,92 | 0,89 |

A partir da classificação da cobertura e uso do solo nas sub-bacias, realizou-se a extração das classes “Floresta Nativa”, “Solo Exposto”, “Pastagem” e “Outros” para áreas adjacentes a drenagem até 500 metros. A tabela 6.6 apresenta a quantificação dessas áreas mapeadas nas décadas de 1980, 1990 e 2000.

Tabela 6.6: Classificação da cobertura e uso do solo nas sub-bacias dos rios analisados em uma área de até 500 metros da rede de drenagem.

| SUB-BACIA DO RIO ARAGUARI | | | |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| CLASSES | Década de 80 | Década de 90 | Década de 2000 |
| OUTROS | ----- | ----- | ----- |
| FLORESTA NATIVA | 7287 | 7257 | 7201 |
| SOLO EXPOSTO/PASTAGEM | 23 | 53 | 109 |
| TOTAL | 7310 | 7310 | 7310 |
| SUB-BACIA DO RIO GURUPI | | | |
| CLASSES | Década de 80 | Década de 90 | Década de 2000 |
| OUTROS | 162 | 217 | 193 |
| FLORESTA NATIVA | 4076 | 3559 | 2889 |
| SOLO EXPOSTO | 1522 | 1270 | 174 |
| PASTAGEM | 1473 | 2188 | 3979 |
| TOTAL | 7234 | 7234 | 7234 |
| SUB-BACIA DO RIO PINDARÉ | | | |
| CLASSES | Década de 80 | Década de 90 | Década de 2000 |
| OUTROS | 278 | 184 | 321 |
| FLORESTA NATIVA | 5521 | 4847 | 4227 |
| SOLO EXPOSTO | 975 | 697 | 340 |
| PASTAGEM | 1642 | 2688 | 3527 |
| TOTAL | 8416 | 8416 | 8416 |
| SUB-BACIA DO RIO GRAJAÚ | | | |
| CLASSES | Década de 80 | Década de 90 | Década de 2000 |
| OUTROS | 151 | 148 | 115 |
| FLORESTA NATIVA | 2929 | 2816 | 2610 |
| SOLO EXPOSTO | 898 | 595 | 962 |
| PASTAGEM | 133 | 1752 | 1624 |
| TOTAL | 5310 | 5310 | 5310 |
| SUB-BACIA DO RIO MEARIM | | | |
| CLASSES | Década de 80 | Década de 90 | Década de 2000 |
| OUTROS | 195 | 143 | 181 |
| FLORESTA NATIVA | 4522 | 4292 | 3995 |
| SOLO EXPOSTO | 968 | 844 | 994 |

| | | | |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| PASTAGEM | 2385 | 2790 | 2899 |
| TOTAL | 8069 | 8069 | 8069 |

A figura 6.8 representa o estado de proteção do solo nas margens dos rios na sub-bacia do Araguari. A rede de drenagem possui mais de 98% de floresta nas margens dos rios. As áreas antropizadas (solo exposto e pastagem). A área antropizada apresentou o percentual de 1,49% do total de áreas adjacentes aos rios, sendo que a maior parte desse desmatamento localizam-se nas margens do rio Amapari, um dos principais afluentes do rio Araguari.

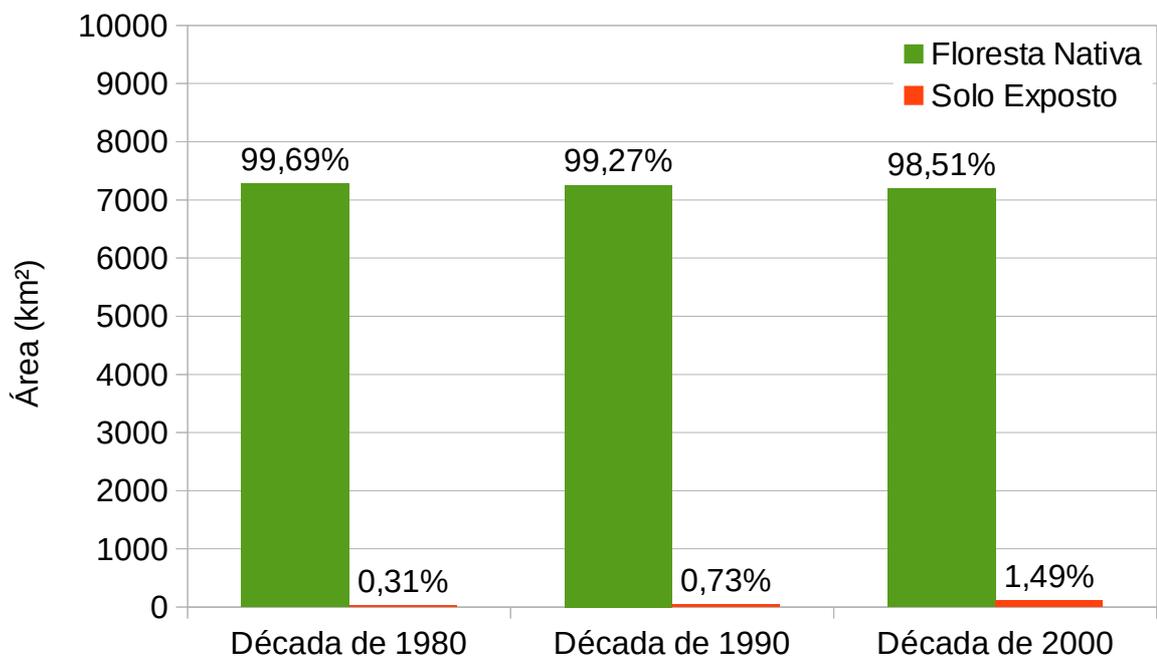


Figura 6.8: Uso do solo nas regiões até 500 metros ao entorno das drenagens na sub-bacia do rio Araguari.

A figura 6.9 destaca o percentual das classes mapeadas nas margens das drenagens na sub-bacia do rio Gurupi. Podemos identificar que entre a década de 1990 e 2000 houve uma redução significativa de solo exposto nas margens dos rios. Essa redução foi de 18% na década de 1990 (1270 km²) para 2% na década de 2000 (174 km²). As margens das drenagens na bacia hidrográfica do Gurupi teve um aumento de áreas de pastagem chegando a 55% (3979 km²) nos anos 2000.

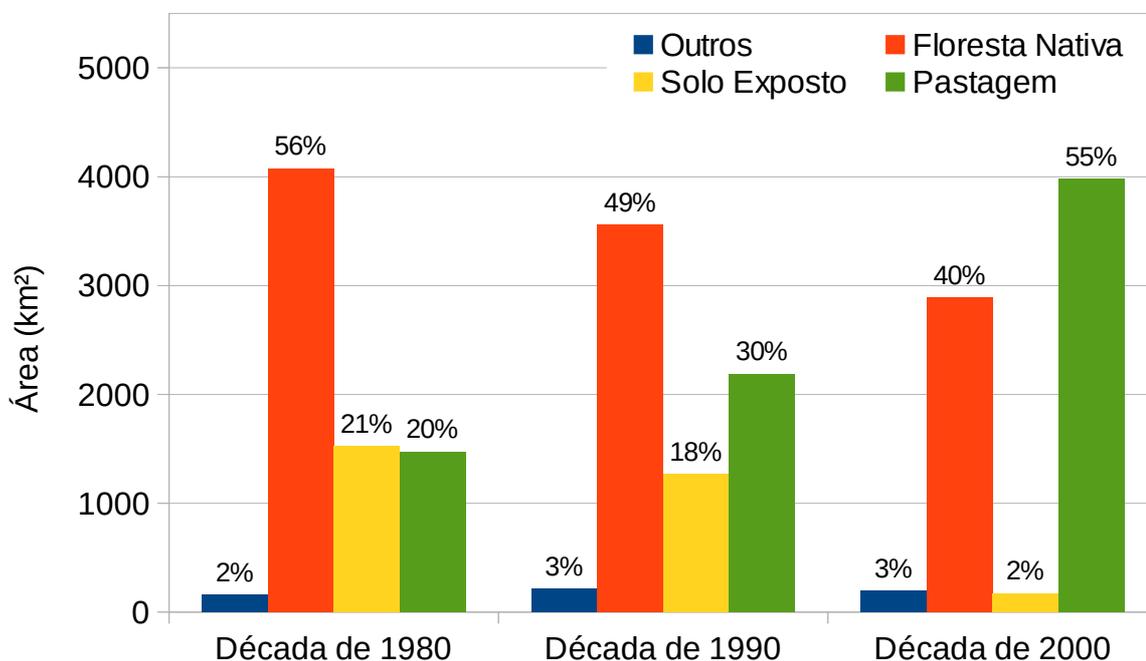


Figura 6.9: Uso do solo nas regiões até 500 metros ao entorno das drenagens na sub-bacia do rio Gurupi.

Essas áreas de pastagem representam o novo eixo de expansão da pecuária e agricultura na região que no final da década de 1990 e início de 2000 a pecuária expandiu para o leste do Pará e houve também o crescimento de culturas anuais (soja, arroz, milho) em pastagens plantadas antigas ao longo do leste do Pará e Maranhão (Barreto et al., 2005).

Em 2007 mais de 60% das áreas desmatadas da amazônia foram destinadas a atividades de pasto e 8% para agricultura (RAISG, 2015).

Conforme Tartari et al. (2012) solo sem cobertura (solo exposto) apresenta maiores valores de taxa de desagregação, quando comparado a outras coberturas. A vegetação cobrindo o solo mostra eficiência na redução da taxa de desagregação do solo. Ao utilizar restos culturais de capim colônio seco na cobertura do solo durante eventos de precipitação, Tartari et al. (2012) observaram uma eficiência de até 75% de redução da taxa de desagregação do solo quando comparado com o solo sem cobertura.

Santos (2010) avaliou a taxa de desagregação em Argissolo Vermelho-Amarelo com condições de preparo de solo convencional. A avaliação ocorreu em duas situações: sem cobertura vegetal e com presença de cobertura vegetal. Ele encontrou uma taxa de desagregação para o solo sem cobertura 12 vezes superiores ao solo com cobertura

constatando a eficiência da cobertura vegetal na redução das taxas de desagregação de até 90%.

A presença de pouco solo sem cobertura vegetal nas margens dos rios na bacia hidrográfica do Gurupi pode ser a resposta para a redução da concentração de sedimentos em suspensão da década de 1990 para 2000.

A figura 6.10 apresenta os percentuais das classes mapeadas nas margens dos rios na sub-bacia do rio Pindaré. Percebe-se uma redução da área de solo sem cobertura vegetal ao longo das décadas mapeadas. Na década de 1980 o solo exposto representava 12% da área adjacente aos rios (975 km²) sendo que na década de 2000 essas áreas chegaram a 4% (340 km²). Houve um aumento de pastagens nas margens dos rios chegando ao percentual de 42% (3527 km²). Porém, 50% das áreas ao entorno da rede de drenagem é constituída por florestas nativas que ajudam a manter o solo livre de agressões antrópicas.

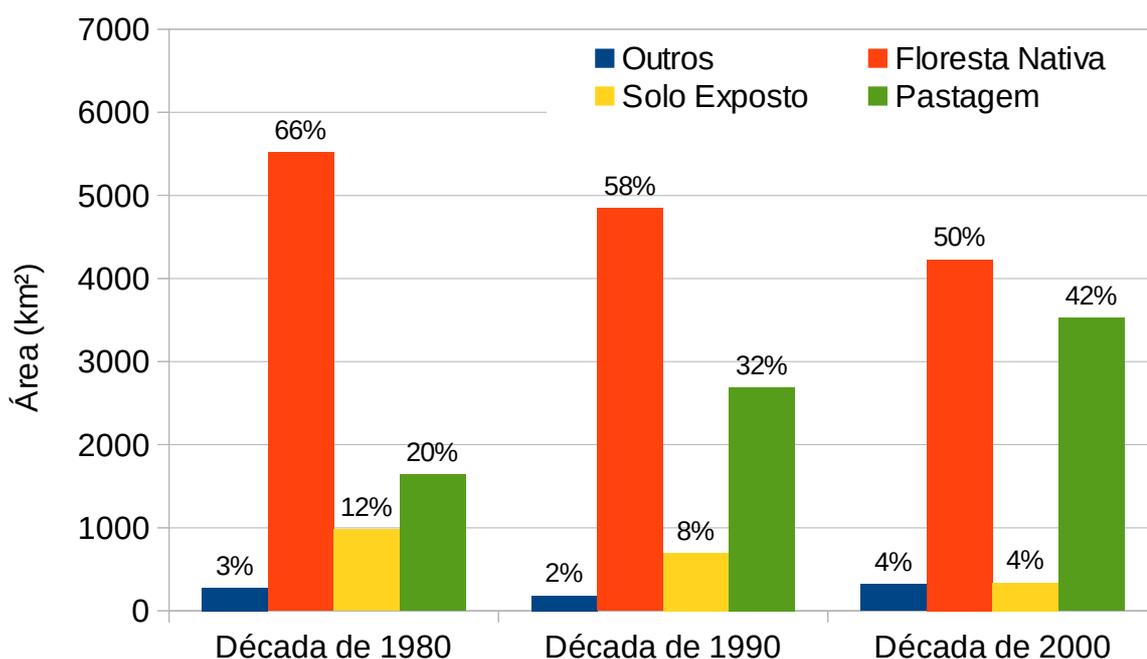


Figura 6.10: Uso do solo nas regiões até 500 metros ao entorno das drenagens na sub-bacia do rio Pindaré.

A figura 6.11 salienta o percentual das classes mapeadas nas margens dos rios na sub-bacia do rio Mearim. A área de floresta nativa reduziu nas margens dos rios 3% a cada década. Contudo, o percentual de floresta representa 50% na década de 2000. Entre as décadas de 1980 e 2000 as pastagens cresceram 6%. Já as áreas de solo exposto permaneceram estáveis variando de 12% para 10% e novamente atingindo o percentual de 12%.

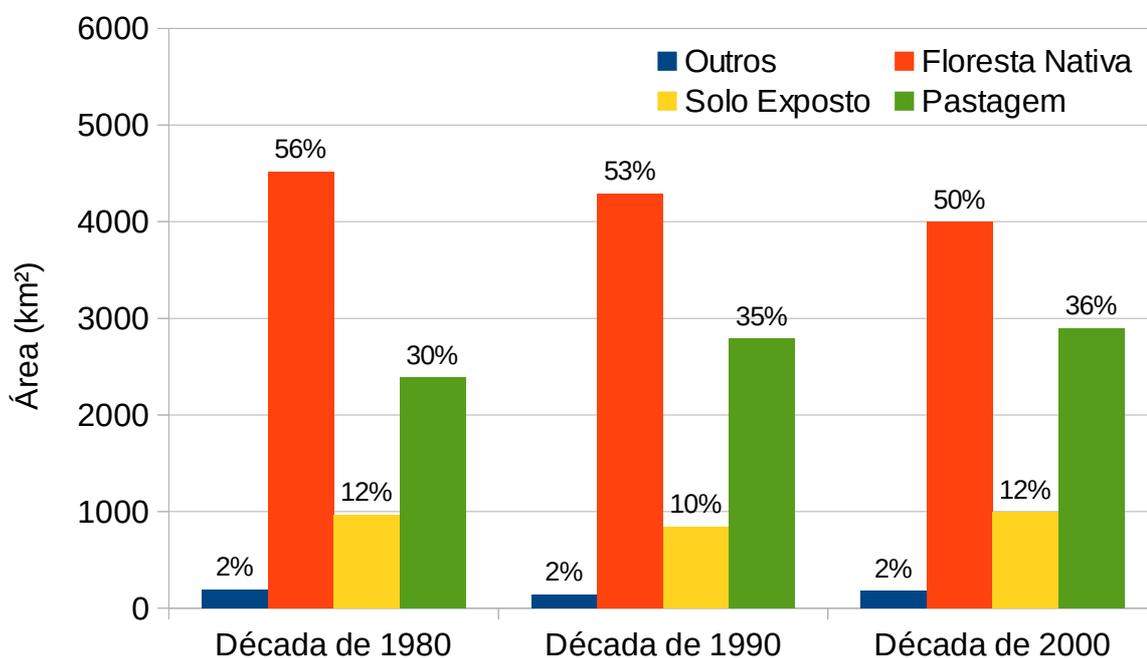


Figura 6.11: Uso do solo nas regiões até 500 metros ao entorno das drenagens na sub-bacia do rio Mearim.

A figura 6.12 evidencia o percentual das classes mapeadas nas margens dos rios na sub-bacia do rio Gurupi. A área de solo exposto variou de 17%, na década de 1980, para 11%, na década seguinte, e subiu para 18% na década de 2000. Entre as décadas de 1980 a 2000, as áreas de pastagem cresceram 6% nas margens dos rios. A floresta nativa foi bastante impactada apresentando redução de 6% ao longo de 3 décadas. Contudo, o percentual de florestas representa 50% nas margens dos rios ajudando a proteger e conter erosão do solo e assoreamento dos rios.

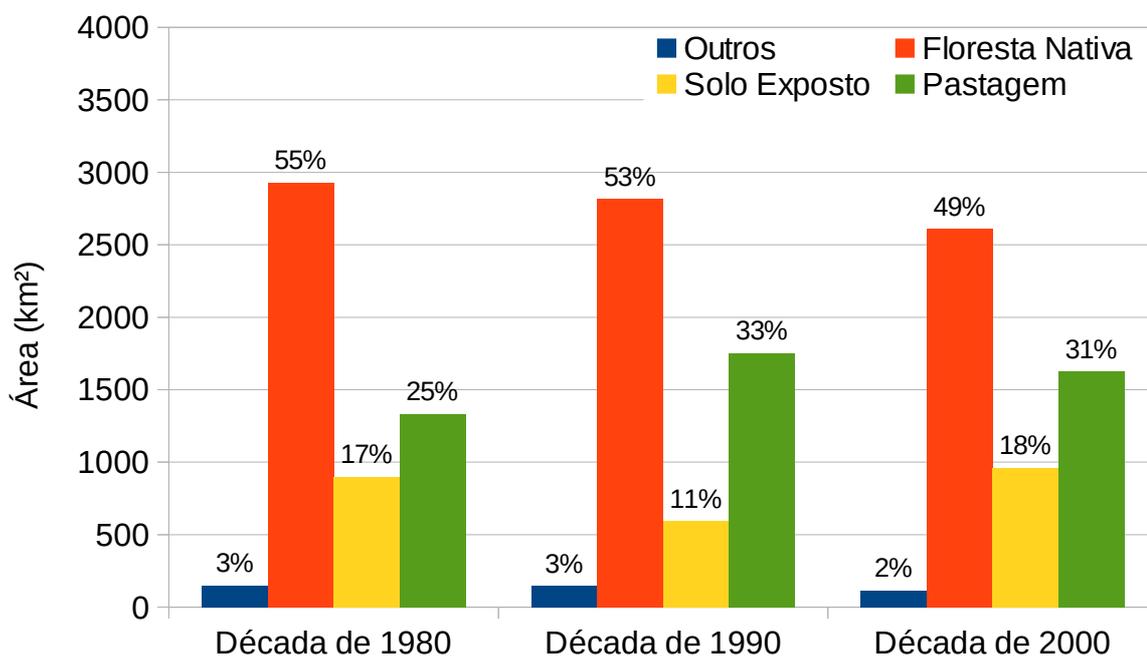


Figura 6.12: Uso do solo nas regiões até 500 metros ao entorno das drenagens na sub-bacia do rio Grajaú.

O Código Florestal prevê faixas e parâmetros diferenciados para as distintas tipologias de APPs, de acordo com a característica de cada área a ser protegida. No caso das faixas mínimas a serem mantidas e preservadas nas margens dos cursos d'água (rio, nascente, vereda, lago ou lagoa), a norma considera não apenas a conservação da vegetação, mas também a característica e a largura do curso d'água, independente da região de localização, em área rural ou urbana (Ministério do Meio Ambiente, 2011).

De acordo com o Código Florestal (art. n.º 2), conforme a largura de um rio existem faixas com extensões variadas para proteção (Tabela 6.7).

Tabela 6.7: Relação entre a largura de um rio e a área de proteção estabelecida no Código Florestal Art. n.º 2 (Consultado em Ministério do Meio Ambiente, 2011).

| Largura de um rio | Faixa de proteção |
|------------------------|-------------------|
| Inferior a 10 metros | 30 metros |
| Entre 10 e 50 metros | 50 metros |
| Entre 50 e 200 metros | 100 metros |
| Entre 200 e 600 metros | 200 metros |
| Maior que 600 metros | 500 metros |

Diante da limitação técnica para representar a extensão dos rios, optamos por realizar um buffer de 500 metros ao entorno de todas as drenagens das sub-bacias com objetivo de analisar os impactos nas Áreas de Proteção Permanente. Sabemos que a delimitação de 500 metros ao entorno dos vetores de drenagem não contempla a real situação em relação a extensão dos rios, pois áreas que deveriam estar sobre proteção não serão contempladas e vice-versa. Contudo, nossa intenção não é delimitar as Áreas de Proteção Permanente (APPs) e sim propor uma análise dos impactos nas áreas próximas aos rios, independente de sua extensão.

6.3.2- Análise de correlação entre as variações de C_{ss} e o desmatamento do PRODES nas margens dos rios nas sub-bacias analisadas.

Realizou-se a correlação linear utilizando o conjunto de dados anuais de desmatamento PRODES, selecionamos nas adjacências dos rios, e as variações de C_{ss}. Os dados PRODES foram utilizados por serem oficiais e possibilitarem a análise de correlação.

Na sub-bacia do rio Gurupi, identificou-se uma correlação linear moderada de 0,62 de 2000 a 2008. Essa correlação aumenta para 0,8 se analisarmos o intervalo de 2001 a 2008 (Figura 6.13).

No ano de 2004, houve um aumento na concentração de sedimentos em suspensão no rio Gurupi. Esse aumento pode estar relacionado com o aumento do desmatamento no estado do Pará e nas margens dos rios que compõem a bacia hidrográfica. Contudo, a concentração de sedimentos em comparação aos rios vizinhos (Pindaré, Grajaú e Mearim) apresenta uma distribuição menor. Essa menor concentração pode refletir o uso do solo nas margens dos rios.

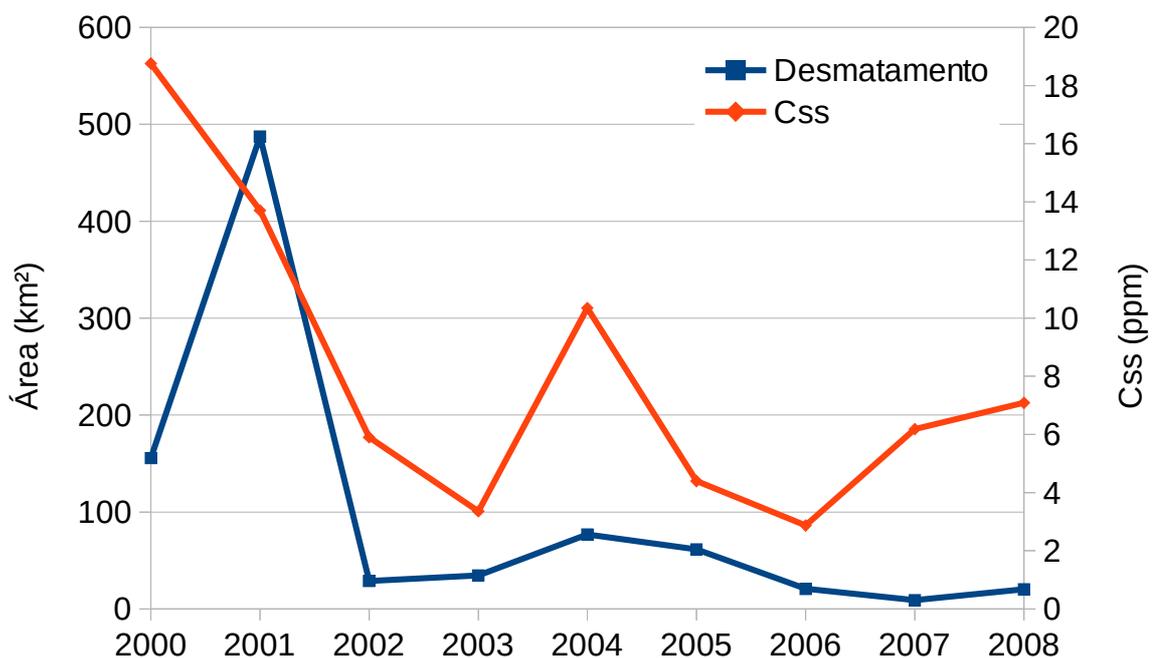


Figura 6.13: Comparação entre a dinâmica do desmatamento em áreas até 500 metros adjacentes aos rios e as variações na concentração de sedimentos em suspensão no rio Gurupi.

A figura 6.14 mostra a relação entre desmatamento nas margens dos rios na bacia hidrográfica do rio Pindaré e a concentração de sedimentos em suspensão no rio principal. Os dados apresentaram uma correlação positiva moderada de 0,63 entre os anos de 2002 a 2008. No ano de 2004 ocorreu um aumento da concentração de sedimentos em suspensão. Esse aumento coincidiu com o aumento do desmatamento no mesmo ano.

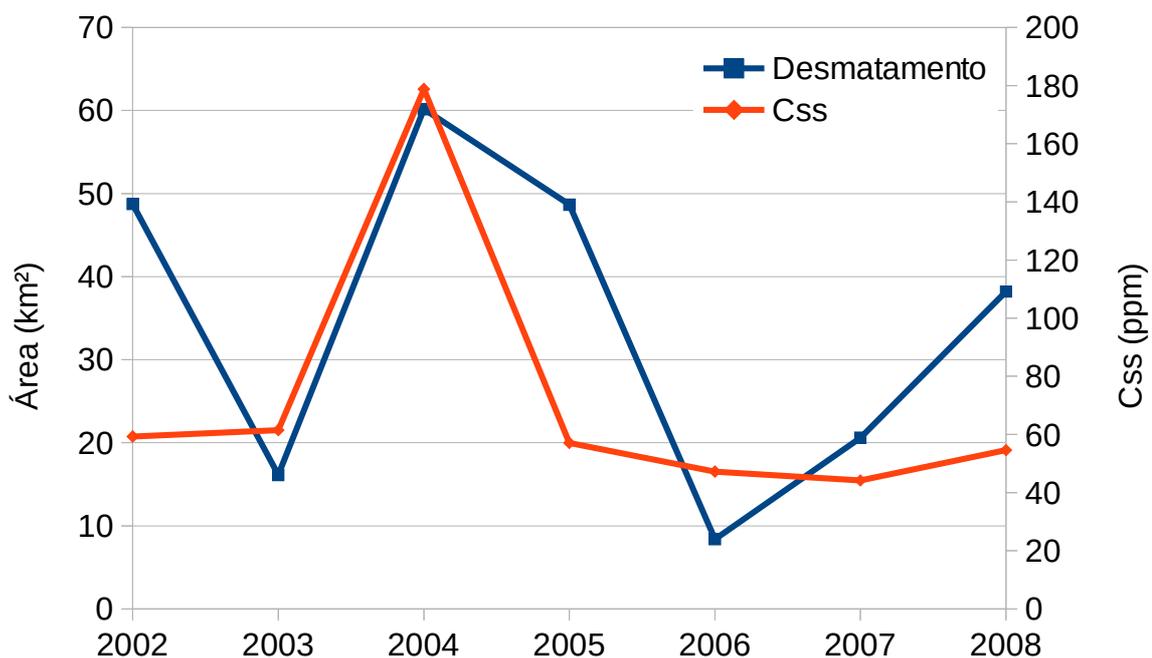


Figura 6.14: Comparação entre a dinâmica do desmatamento em áreas até 500 metros adjacentes aos rios e as variações na concentração de sedimentos em suspensão no rio Pindaré.

Analisando a relação entre a concentração de sedimentos em suspensão na sub-bacia do rio Mearim e o desmatamento ao entorno da drenagem na bacia hidrográfica deste rio, identificamos uma correlação linear positiva de 0,86 entre essas variáveis durante o período de 2000 a 2008 (figura 6.15).

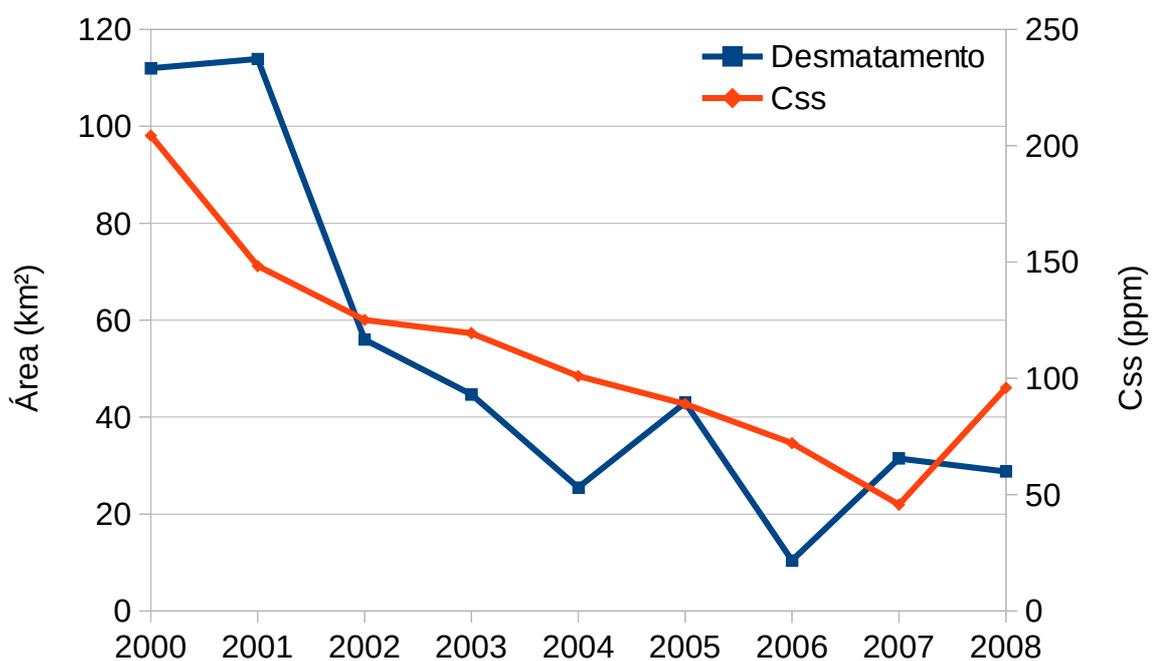


Figura 6.15: Comparação entre a dinâmica do desmatamento em áreas até 500 metros adjacentes aos rios e as variações na concentração de sedimentos em suspensão no rio Mearim.

Os resultados ressaltam uma relação positiva entre as variações das áreas desmatadas nas margens das drenagens com a concentração de sedimentos em suspensão nas sub-bacias dos rios Gurupi, Pindaré e Mearim. Porém, esta relação não apresentou correlação representativa para as sub-bacias dos rios Araguari e Grajaú (correlação linear abaixo de 0,20). Outros fatores devem ser analisados para compreender a dinâmica de C_{ss} nessas bacias hidrográficas. O manejo inadequado do solo pode levar ao aumento da erosão independente do aumento de áreas desmatadas.

6.3.3- Análise de correlação entre as variações de Css e a produção mineral da ICOMI na sub-bacias do rio Araguari.

As variações na concentração de sedimentos em suspensão com os dados de desmatamento do PRODES apresentaram correlação fraca (-0,36) entre 2003 e 2008.

As áreas desmatadas nas margens do rio Amapari devem apresentar uma área representativa de pastagem apesar da dificuldade em separar pastagem de solo exposto na sub-bacia do Araguari. Analisando o histórico de ocupação da região, identificamos as principais atividades que podem estar relacionadas com as variações de concentração de sedimentos em suspensão no rio Araguari.

O Estado do Amapá foi criado em 1943 e a atividade de mineração foi o elemento-chave para modernização da região (Villela e Almeida, 1966; Urech, 1955). A partir de 1957, iniciaram as atividades de mineração na região de Serra do Navio, município amapaense localizado próximo ao rio Amapari, para exploração de manganês voltada a exportação. A implementação da ICOMI (Mineradora Indústria e Comércio de Minérios S. A.) levou ao desenvolvimento da região com a instalação de infraestrutura como as vilas residenciais de Serra do Navio e Amazonas e a construção de uma estrada de ferro com mais de 190 quilômetros conectando Serra do Navio ao Porto de Santana (Monteiro, 2003).

A infraestrutura proporcionada pela ICOMI gerou profundas transformações na paisagem as margens do rio Amapari. A empresa operou de 1957 a 1997 e encerrou suas operações deixando rejeitos a céu aberto e rios contaminados. Conforme Monteiro (2003) os impactos socioambientais provocados pela mineradora ainda são imensuráveis.

Ao analisar a relação entre a produção da ICOMI e a concentração de sedimentos em suspensão, encontramos uma relação positiva expressa por correlação (figura 6.16).

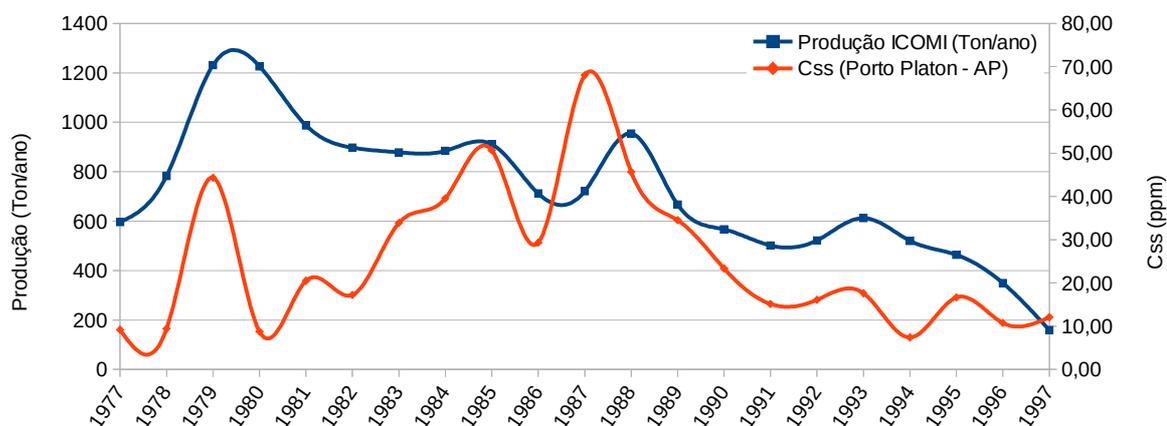


Figura 6.16: Análise da variação de concentração de sedimentos em suspensão com a produção mineral da ICOMI.

O declínio da mineradora ICOMI começou em 1979 (Monteiro, 2003). Se analisarmos a relação entre a produção de minério de manganês e a concentração de sedimentos em suspensão, encontraremos uma correspondência de 0,4 (correlação fraca positiva). Porém, se analisarmos a correspondência em uma janela temporal de 1987 a 1997 a correlação sobe para 0,7. O colapso da mineradora pode ter relação com a diminuição da concentração de sedimentos em suspensão devido a redução de impactos ao meio ambiente aquático.

Nas atividades a céu aberto, tem-se um maior aproveitamento da substância mineral, porém e neste tipo de lavra que acontecem os maiores impactos ambientais, produzindo maior quantidade de resíduos, poeira em suspensão, vibrações e riscos de poluição das águas (Gonçalves, 2009).

Um vetor de desmatamento na região é a rodovia BR-210 e suas vicinais que propiciou a introdução de atividades de pasto para criação de gado. Com a implantação da pecuária houve a necessidade da remoção da cobertura vegetal, formada por densas florestas. A remoção da cobertura vegetal pode provocar grandes danos ao meio ambiente através da exposição do solo, bastante argiloso, ao pisoteio dos animais diminuindo a capacidade de infiltração das águas pluviais, favorecendo a erosão (Gonçalves, 2009).

Gonçalves (2009) observou grande turbidez da água no igarapé do William (próximo ao rio Amapari) denotando grande quantidade de material argiloso em suspensão sendo descarregado no rio Amapari. Esse acontecimento foi em 2007 nas proximidades da empresa mineradora Anglo Ferrous Brazil localizada no município de Pedra Branca.

Ao longo do rio Amapari nas proximidades das áreas das grandes mineradoras (ICOMI e Anglo Ferrous Brazil) existem muitas atividades de garimpeiros nas margens dos

rios. As áreas garimpadas foram desmatadas, descapadas e assoreadas, ou seja, todo seixo, areia, silte, argila e outras matérias aluvionais existentes foram escavados, trabalhados, removidos e depositados em pequenos e diversos pontos formando um monte de rejeitos que durante o período chuvoso são lavados e escoam em direção aos rios (Gonçalves, 2009).

6.3.4- Análise de correlação entre as variações de C_{ss} e a orizicultura na sub-bacia do rio Grajaú.

As variações de sedimentos no rio podem ser reflexo do uso inadequado do solo. Contudo, precisamos analisar as variações de sedimentos em suspensão com uma cultura bastante comum e que impacta bastante o solo no estado do Maranhão.

Selecionamos dados de produção de Arroz (Orizicultura). O motivo desta escolha é devido ao fato de que o arroz é um produto que necessita de água em abundância para crescer e o ideal seria plantá-lo em regiões próximas de rios, lagos ou que chova com frequência. Portanto esta cultura pode provocar impactos significativos caso esteja sendo plantada nas margens de rios e com manejo inadequado do solo. A instalação de lavouras junto às margens dos rios sem atentar para as faixas de proteção (APPs) com vegetação ciliar tem como principal impacto o comprometimento das margens, o que facilita a erosão e o assoreamento do leito dos corpos hídricos (EPAGRI, 2005).

O preparo do solo em lavouras com taipas baixas permite que a água com argila em suspensão seja levada para os rios, acarretando em problemas de assoreamento dos rios. (EPAGRI, 2005).

O cultivo de arroz, no sistema de vazante, possui grande importância socioeconômica e é caracterizado, na Baixada Maranhense, pela baixa utilização de insumos químicos, onde os trabalhos são, normalmente, realizados por mão de obra familiar, com o uso de instrumentos simples e em pequenas áreas (Farias Filho & Ferraz Júnior, 2013).

Foram selecionados dados de produção de arroz do censo agropecuário 2008. A tabela 6.8 resume a produção anual em toneladas nos municípios localizados na baixada maranhense a montante da estação sedimentológica de Aratoi Grande na sub-bacia do rio Grajaú.

Tabela 6.8: Produção de arroz em toneladas por ano nos municípios da baixada maranhense na sub-bacia do rio Grajaú e sua correlação linear com a concentração de sedimentos em suspensão do rio Grajaú.

| MUNICÍPIOS | PRODUÇÃO DE ARROZ (TON/ANO) | | | | | R |
|--------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | |
| Altamira do Maranhão | 1417 | 1425 | 654 | 1096 | 1176 | 0,62 |
| Arame | 10750 | 10800 | 10400 | 9460 | 9555 | 0,75 |
| Brejo de Areia | 5448 | 5797 | 2610 | 4698 | 4933 | 0,58 |
| Itaipava do Grajaú | 6930 | 8732 | 7894 | 7983 | 7985 | 0,41 |
| Lagoa Grande do Maranhão | 3583 | 6607 | 2594 | 6160 | 6469 | 0,24 |
| Lago da Pedra | 7543 | 13645 | 3960 | 6160 | 7690 | 0,88 |
| Marajá do Sena | 9904 | 9904 | 3622 | 7201 | 7699 | 0,63 |
| Olho d'Água das Cunhãs | 1601 | 1601 | 1319 | 1380 | 1312 | 0,85 |
| Paulo Ramos | 7346 | 6394 | 3478 | 5800 | 6168 | 0,39 |
| Satubinha | 1734 | 1565 | 1183 | 1292 | 1331 | 0,64 |
| Vitorino Freire | 5706 | 5902 | 2860 | 5857 | 5764 | 0,31 |
| TOTAL | 61962 | 72372 | 40574 | 57087 | 60082 | 0,71 |

Houve uma correspondência de 0,71 entre a concentração de sedimentos em suspensão no rio Grajaú e a produção total anual de arroz nos municípios da sub-bacia. De 11 municípios produtores, 3 apresentaram uma correspondência muito forte, 4 apresentaram uma correspondência moderada, 4 tiveram relação fraca. Esses municípios juntos produziram mais de 72 mil toneladas de grãos de arroz no ano de 2004. O aumento da precipitação e vazão e a alta produção de arroz em 2004 podem ter relação com o aumento de concentração de sedimentos no rio Grajaú.

6.3.5- Ocupação na zona costeira amazônica, desmatamento e áreas de proteção.

A zona costeira amazônica desde a década de 1960 vem sofrendo impactos antrópicos representados pela atividade madeireira, pecuária, expansão da agricultura, atividades de mineração e ampliação da infraestrutura regional. Essa infraestrutura e o fornecimento de crédito estimularam um fluxo migratório para a região amazônica inicialmente no sul e posteriormente nos grandes centros urbanos. Os estudos de Geist e Lambim (2001; 2002) demonstraram que as causas próximas diretas ao desmatamento na Amazônia são a expansão das pastagens e áreas agrícolas, extração de madeira e implementação de infraestrutura. Essas

causas diretas seriam governadas por causas associadas ao crescimento do mercado econômico.

Durante séculos, o processo de ocupação da Amazônia ocorreu através dos rios navegáveis. Porém, a partir da década de 1960 essa situação altera com a construção de rodovias e implementação de mais infraestrutura. Entre 1960 a 2001 a população da Amazônia cresceu de 4 para 20 milhões. Isso levou ao inchaço de cidades e surgimento de novos centros urbanos (Barreto et al., 2005).

De acordo com Kaimowitz & Angelsen (1998) “desmatamento” significa a remoção completa e no longo prazo da cobertura de árvores. O desmatamento inicia com a abertura de estradas permitindo a ocupação e oficial ou irregular de terras à exploração de madeiras nobres. Posteriormente a área explorada converte-se em terreno para agricultura familiar e pastagens para criação de gado. Esse processo é responsável por 80% do desmatamento na região amazônica (Ferreira, 2005).

A abertura de rodovias na década de 1960 impulsionou a exploração de madeira no estado do Pará permitindo acesso a extensas áreas florestais preservadas de terra firme a leste e sul do estado. Antes disso, a exploração de madeira era situada nas áreas de várzea dos rios Pará, Tocantins e em menor escala Amazonas (Veríssimo et al., 2002).

Nepstad et al. (1999) demonstraram que 3/4 do desmatamento no período de 1978 a 1994 ocorreram dentro de uma faixa de 100 km de largura ao longo das rodovias BR-010, BR-364 e PA-150.

Dentre as frentes madeireiras próximas à zona costeira amazônica, podemos citar a Zona Leste que é a antiga fronteira na qual constituía-se de florestas de terra firme e de fácil acesso devido as rodovias BR-010 e PA-150. Entre 1988 e 1990 ocorreu o auge da exploração de madeira na região representado pelo principal polo de Paragominas. Contudo, após três décadas de exploração intensa a região passa por uma redução de seus estoques naturais de madeira. Essa zona é responsável por 65% da produção de tora do estado e tem como principais produtores os municípios de Paragominas, Tailândia, Tome-açu, Jacundá e Breu Branco (Veríssimo et al., 2002). Essa região Leste do Pará e Oeste do Maranhão possuem histórico de desmatamento desde a década de 1970 (Rivero et al., 2009).

A pecuária bovina também está fortemente associada com o desmatamento da Amazônia, sendo sua causa imediata mais importante. Rivero et al. (2009) analisou regressões entre dados de desmatamento, pecuária e agricultura e os resultados mostraram que o

crescimento da agricultura de larga escala, em vez de reduzir, amplia o impacto da pecuária sobre o desmatamento.

Conforme Barreto et al. (2005), a pecuária é o principal uso do solo em áreas desmatadas na amazônia. Até 1995 as áreas desmatadas e usadas para pecuária ocupavam cerca de 70% do total. A atividade pecuarista expandiu bastante a partir da década de 1990 chegando a registrar um aumento do rebanho bovino de 27 milhões em 1990 para 64 milhões em 2003.

No final da década de 1990 e início de 2000 a pecuária expandiu para o Leste do Pará. Houve também o crescimento de culturas anuais (soja, arroz, milho) em pastagens plantadas antigas ao longo do leste do Pará e Maranhão (Leste da Amazônia) (Barreto et al., 2005).

Apesar do desmatamento apresentar redução nas taxas nas regiões de ocupação mais densa e antiga a partir de 2006 (Nordeste e Sudeste do Pará e Leste do Maranhão), os impactos sobre a cobertura do solo continuam e tendem a ter uma dinâmica própria dando continuação a ação de desmatar. Essas ações estão associadas à expansão dos cultivos e das pastagens e aos novos investimentos nas áreas já ocupadas (Rivero et al., 2009).

A zona costeira amazônica está sujeita aos impactos promovidos pela abertura de estradas, que permite a ocupação de terras à exploração de madeiras e posteriormente a implementação de áreas convertidas em terreno para agricultura familiar e pastagens para criação de gado. Destaca-se também nesse processo a mineração formal e informal.

Essa ocupação não respeita a conservação da floresta nativa e dos solos. Os impactos da remoção da vegetação ocorrem desde a década de 1960, estimulados por um plano de integração da região amazônica ao restante do território nacional por meio da exploração de recursos naturais.

Os dados, apresentados neste capítulo, mostram que a cobertura do solo sem vegetação e as atividades antrópicas podem levar ao aumento da erosão na área das sub-bacias. Os impactos mais importantes analisados estão nas margens dos rios que deveriam ser totalmente preservadas em prol do Código Florestal (art. nº 2) que define áreas de proteção integral nas margens dos rios com faixas variando de acordo com a extensão dos corpos d'água.

As Unidades de Conservação são criadas buscando garantir a sobrevivência da biodiversidade, os recursos genéticos e proteger os processos ecológicos essenciais para manutenção do meio ambiente (MMA, 2011).

Além das UCs, existem outras áreas que devem ser protegidas sempre por lei, independentemente de sua localização. Essas áreas são as margens de rios, nascentes e topos de morro, etc. Essas áreas são denominadas Áreas de Preservação Permanente (APPs), independentemente de estarem em áreas rurais ou urbanas, em terras particulares ou públicas (MMA, 2011).

As áreas protegidas podem representar uma excelente estratégia para conter ou diminuir o processo de desmatamento na amazônia (Ferreira et al., 2005). Muitas críticas são feitas a respeito das áreas protegidas com relação a sua eficácia devido ao fato de muitas não estarem implementadas e apresentarem diferentes graus de vulnerabilidade (Sá e Ferreira, 2000). Contudo, Ferreira et al. (2005) demonstram que as áreas protegidas na amazônia podem ser eficazes na estratégia de reduzir o desmatamento na amazônia.

Souza Filho et al. (2016) analisaram as mudanças na cobertura da terra num período de 40 anos na área da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (Sudeste do Pará). Entre 1973 a 2013 as áreas de floresta ao entorno das Áreas Protegidas e Terras Indígenas, existente na Bacia do rio Itacaiúnas, foram sendo desmatadas sendo transformadas em pastagem. O desmatamento atingiu 52% da área da bacia e contribuiu para um aumento de temperatura local em 1,7° C e provocou mudanças na paisagem. As áreas protegidas na bacia do rio Itacaiúnas são importantes para ajudar na manutenção do regime hidrológico local e mostram na prática como as áreas protegidas podem impedir o avanço do desmatamento.

A manutenção da floresta na zona costeira amazônica é de grande importância para o equilíbrio dos processos naturais e contenção dos processos erosivos na amazônia.

6.5- CONCLUSÃO.

A análise das variações de concentração de sedimentos em suspensão em um rio podem nos fornecer pistas sobre a paisagem em uma bacia hidrográfica. As variações de concentração de sedimentos podem indicar o estado da cobertura do solo (sem cobertura e com cobertura vegetal), o tipo de solo (presença de areias, silte e argila), o regime pluviométrico (intensidade das chuvas e a variação da vazão) e o uso do solo (atividades econômicas).

Ao analisar as variáveis desmatamento e Css nas sub-bacias dos rios Araguari, Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim, verificamos dinâmicas diferentes. De forma geral, o desmatamento possui relação com a concentração de sedimentos em suspensão nos rios, porém apenas a ação de remover a cobertura vegetal do solo não responde linearmente as variações dessas concentrações. As ações antrópicas na Amazônia, representada por várias atividades (extração de madeira, pecuária, agricultura, mineração, etc), podem estar influenciando na dinâmica dos sedimentos transportados nos rios amazônicos. Encontramos indícios dessa intervenção humana relacionando dados de produção mineral e agricultura com os dados médios anuais de Css.

O rio Araguari apresentava Css mais elevada, nas décadas de 1970 até o final da década de 1980 do que nas décadas de 1990 e 2000. Essa redução nos valores médios de Css no rio Araguari apresentaram uma correlação forte com a diminuição da produção de manganês pela ICOMI nas margens do rio Amapari (importante afluente do rio Araguari).

No litoral nordeste do Pará e Maranhão estão as sub-bacias do Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim. Estão em áreas mais impactadas pela atividade humana em relação a remoção de cobertura florestal (desmatamento) e desenvolvimento de atividades econômicas (pecuária, agricultura e mineração). Nessas sub-bacias encontramos correlações fortes e moderadas entre o desmatamento e a concentração de sedimentos. Utilizando dados do censo agropecuário de 2010, encontramos uma correlação forte entre a produção de arroz e a Css no rio grajau (Maranhão). Isso indica que as atividades antrópicas, como a orizicultura, podem influenciar nas variações de sedimentos transportados pelos rios.

Para ter uma compreensão das variações de concentração de sedimentos nos rios não podemos considerar apenas a relação com a vazão. De fato as atividades antrópicas influenciam na dinâmica dos sedimentos, porém a compreensão do processo requer análises mais detalhadas em escalas temporais menores e necessita de mais dados sobre os impactos socioambientais das atividades econômicas.

7- CONSIDERAÇÕES FINAIS.

As áreas de manguezais na zona costeira amazônica estão expandindo de uma forma geral. Ao compartimentarmos o litoral em dois setores, identificamos que no setor correspondente a Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Ocidental os manguezais estão em expansão; enquanto que na Região Hidrográfica Amazônica a área de manguezal foi reduzida nos últimos 40 anos.

Na Região Hidrográfica Amazônica identificamos uma cobertura do solo com maior cobertura vegetal (a exemplo da sub-bacia do rio Araguari) ao contrário da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental que apresenta um nível de antropização maior (sub-bacias do Gurupi, Pindaré, Grajaú e Mearim). As sub-bacias analisadas possuem médias de vazão e concentração de sedimentos em suspensão diferentes. Os rios com menor vazão e maior antropização apresentaram maiores concentrações de sedimentos em suspensão (Mearim, Grajaú e Pindaré). Já o rio que apresentou maior vazão com maior cobertura vegetal sob o solo teve sua concentração de sedimentos em suspensão reduzida ao longo de 32 anos (rio Araguari). Identificamos situações de rio com uma vazão expressiva com alto nível de antropização, porém apresentou concentração de sedimentos em suspensão baixa (rio Gurupi) que pode possuir relação com o uso do solo.

Calculamos a descarga sólida em suspensão nos rios (Q_{ss}) e no balanço entre vazão e concentração de sedimentos em suspensão, os rios no Estado do Maranhão apresentaram Q_{ss} superiores aos dos rios com maiores vazões (Araguari-AP e Gurupi-PA/MA).

As variações nos valores médios anuais de vazão apresentaram correlações moderadas com as anomalias de temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico Equatorial Sul e Atlântico Tropical Norte. Isso é uma boa indicação que os fenômenos El Niño/La Niña e Zona de Convergência Intertropical influenciam no regime de precipitação na zona costeira amazônica.

As variações de sedimentos em suspensão apresentaram comportamento que não puderam ser relacionados apenas ao desmatamento. Isso indica que as atividades econômicas podem ser o caminho para compreender as alterações de sedimentos em suspensão nos rios. Relacionamos duas atividades econômicas (mineração e agricultura) com a concentração de sedimentos em duas sub-bacias (Araguari e Grajaú) e encontramos correlação dessas atividades com as variações de C_{ss} .

Concluimos que a expansão dos manguezais na zona costeira amazônica é reflexo de um conjunto de fatores (mudanças climáticas, marés, correntes de marés, vazão dos rios, salinidade nos estuários, variações de Qss e nutrientes disponíveis no litoral, etc). Contudo, conseguimos identificar que os rios com maior contribuição sedimentar possuem menor vazão e maior nível de impactos antrópicos sobre o solo. A remoção da cobertura vegetal influencia no transporte de sedimentos pelos rios e as atividades econômicas com manejo inadequado do solo podem acelerar o processo de erosão dos solos, bem como a dinâmica dos manguezais na foz dos rios.

Os resultados produzidos nesta pesquisa possibilitam o surgimento de novos questionamentos, como: qual o risco à erosão do solo nas sub-bacias costeiras analisadas? Qual a relação e percentual de atividades de mineração, agricultura, pecuária e extração de madeira na zona costeira amazônica com a concentração de sedimentos dos rios? Os sedimentos finos (areia fina, silte e argila) encontrados nas sub-bacias e na foz dos rios tem a mesma origem? Esses questionamentos serão etapas das próximas pesquisas na busca pela compreensão dos processos naturais e antrópicos que influenciam na dinâmica das áreas de manguezais na zona costeira amazônica.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas (ANA). 2016. Regiões Hidrográficas. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: Junho de 2014.
- Allison, M. A. & Lee, M. T. 2004. Sediment exchange between Amazon mudbanks and shore-fringing mangroves in French Guiana. *Mar. Geol.*, 208: 169-190.
- Alongi, D.M. 2002. Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29, 331-349.
- Alongi, D.M. 2008. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76, 1-13.
- Avelar, V. G. 2002. Geocronologia Pb-Pb em zircão e Sm-Nd rocha total da porção Centro - Norte do Estado do Amapá - Brasil: implicações para a evolução geodinâmica do setor oriental do escudo das Guianas. Programa de Pos-graduação em Geologia e Geoquímica da Universidade Federal do Pará, Belém, PA. Tese de Doutorado, 232 pp.
- Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, C., Koch, E., Stier, A.C., Silliman, B.R., 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol. Monogr.* 81, 169-193.
- Barreto, P., Souza Jr., C., Nogueron, R., Anderson, A., & Salomao, R. 2005. Pressão Humana na Floresta. Belém: WRI; Imazon.
- Batista, E. M., Souza Filho, P. W. M., Silveira, O. F. M. 2009. Avaliação de áreas deposicionais e erosivas em cabos lamosos da zona costeira amazônica através da análise multi-temporal de imagens de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)* , v. 27, p. 83-96.
- Blaschke, T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 2-16. <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>
- Boulhosa, M. B. M., Souza Filho, P. W. M. 2009. Reconhecimento e mapeamento de ambientes costeiros para geração de mapas de índice de sensibilidade ambiental ao

derramamento de óleo, Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)*, v. 27, p. 23-37.

Botelho, R. G. M., Silva, A. S. 2004. *Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental* In: Vitte, Antônio Carlos; Guerra, Antônio José Teixeira. (organizadores) *Reflexões sobre a como montar uma empresa geografia física no Brasil* Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

Brito, R. N. R., Asp, N. E., Beasley, C. R., Santos, H. S. S. 2009. Características Sedimentares Fluviais Associadas ao Grau de Preservação da Mata Ciliar - Rio Urumajó, Nordeste Paraense. *Revista Acta Amazônica*, V.39, N. 1, p. 173-180.

Cardoso, G. F., Souza, C., Souza Filho, P. W. M. 2014. Using spectral analysis of Landsat-5 TM images to map coastal wetlands in the Amazon River mouth, Brazil. *Wetlands Ecology and Management*, v. 22, p. 79-92.

Carney, J., Gillespie, T. W., & Rosomoff, R. 2014. Assessing forest change in a priority West African mangrove ecosystem: 1986–2010. *Geoforum*, 53, 126–135. <http://doi.org/10.1016/j.geoforum.2014.02.013>

Carvalho, N. O. 1995. Erosão Crescente na Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Recursos Hídricos*. Vol. 13, Nº 2, 5-19 p.

Carvalho, N. O. 2008. *Hidrossedimentologia Prática*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 599 p.

Carvalho, N. O.; Filizola Jr., N. P. 2000. *Guia de Práticas Sedimentométricas*. Brasília – DF: ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 154p.

Chavez, P.S. Jr. 1988. An Improved Dark Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data, *Remote Sensing of Environment*, 24, pp.459-479.

Cohen, J. C. P., Cavalcanti, I. F. A., Braga, R. H. M. 2009. Linhas de instabilidade na costa N-NE da América do Sul. In: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J.; Silva, M. G. A. J.; Dias, M. A. F. S. (Orgs.). *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Texto, p. 75-92.

- Colby, B. R. 1957. Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. Transactions, Amer. Geophy. Union. Vol . 38, n. 5, oct, pp.708-719.
- Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). 2015. Deliberações: resoluções. Disponível em: http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14. Acesso em: Julho de 2015.
- CPTEC/INPE. 2016. El Niño e La Niña. Acesso em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Data de acesso: 20 de Março de 2016.
- Cunha, S. B. 2005. Geomorfologia Fluvial. In: Guerra, A. J. T. & Cunha, S. B. (orgs.). Geomorfologia. Uma atualização de bases e conceitos. Bertrand, Rio de Janeiro.
- Desclée, B., Bogaert, P., & Defourny, P. 2006. Forest change detection by statistical object-based method. Remote Sensing of Environment, 102(1-2), 1-11. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.013>
- Diniz, C. G., Souza Filho, P. W. M., Cohen, M. C. L. 2012. Mapping mangroves at genus level from object-based classification of IKONOS image. In: 9th INTECOL International Wetlands Conference, 2012, Orlando, Florida - EUA. 9th INTECOL International Wetlands Conference.
- Dittmar, T., Hertkorn, N., Kattner, G., Lara, R.J., 2006. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans. Global Biogeochem. Cycles 20 (GB1012), 1-7.
- Dyonisio, H. A. F. 2010. Erosão hídrica: suscetibilidade do solo. Revista Eletrônica Thesis, São Paulo, ano VII, n. 13, p. 15-25, 1º semestre.
- Ellison, J. C., Stoddart D. R. 1991. Mangrove ecosystem collapse during predicted sea-level rise: Holocene analogues and implications. Journal of Coastal Research 7(1): 151-165.
- Eisma D. 1986. Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. Netherlands Journal of Sea Research 20: 183-199.
- Enfield, D. B. & Mayer, D. A. 1997. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation. J. Geophys. Res., 102, 929-945.

- EPAGRI. 2005. Sistema de produção de arroz irrigado em Santa Catarina, 2.ed. revisado e atualizado. Florianópolis, 2005. 87p
- ESRL/NOAA. 2016. Description of Tropical SST Predictions. Acesso em: <<http://www.esrl.noaa.gov/psd/forecasts/sstlim/descr.html>>. Data de Acesso: 10 de Junho de 2016.
- Farias Filho, M. S. & Ferraz Júnior, A. S. de L. 2013. A Cultura do arroz em sistema de vazante na baixada maranhense, periferia do sudeste da amazônia. Pesquisa Agropecuária Tropical. v. 39, n. 2, p. 82-91, abr./jun. 2009. ISSN 1517-6398 / e-ISSN 1983-4063.
- Ferreira, L. V., Venticinque, E., & Almeida, S. 2005. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. Estudos Avançados, 19(53), 157–166. <http://doi.org/10.1590/S0103-40142005000100010>
- Field C. D. 1995. Impact of expected climate change on mangroves. *Hydrobiologia* 295: 75-81.
- Flanders, D., Hall-Beyer, M., & Pereverzoff, J. 2003. Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(4), 441-452.
- Geist, H. J., Lambin, E. F. 2002. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *BioScience*, v. 52, p. 143-150, 2002.
- Geist, H., Lambin, E. 2001. What drives tropical deforestation? A meta analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence. LUC International Project Office, Louvain-la-neuve - Belgium, 2001.
- Gensac, E., Martinez, JM., Vantrepotte, V., Anthony, E. J. 2016. Seasonal and inter-annual dynamics of suspended sediment at the mouth of the Amazon river: The role of continental and oceanic forcing, and implications for coastal geomorphology and mud bank formation. *Continental Shelf Research*. v. 118, 49-62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2016.02.009>
- Gerra, A. J. T. & Mendonça, J. K. S. 2004. Erosão dos Solos e a Questão Ambiental. In: Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil / Antônio Carlos Vitte & Antônio José Teixeira Guerra (Organizadores). - Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 280 p.

- Giri, C., Long, J., Abbas, S., Murali, R. M., Qamer, F. M., Pengra, B., & Thau, D. 2014. Distribution and dynamics of mangrove forests of South Asia. *Journal of Environmental Management*, 148, 1–11. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.020>
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J., Duke, N. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, p. 1-6.
- Godoy, M. D. P., Lacerda, L. D. 2015. Mangroves response to Climate Change: A review of recent findings on mangrove extension and distribution. *Anais da Academia Brasileira de Ciências (Online)*, v. 87, p. 651-667.
- Godoy, M. D. P. 2015. Alteração nas áreas de mangue em estuários no Estado do Ceará devido a mudanças nos usos do solo e mudanças climáticas / Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza. 94f.: il. color., enc. ; 30 cm.
- Godoy M. D. P., Lacerda L. D. 2014. River-island response to land-use change within the Jaguaribe River, Brazil. *Journal of Coastal Research* 30 (2): 399-410.
- Gonçalves, F. D., Souza Filho, P. W. M., Paradella, W. R., Miranda, F. P. 2009. Fusão de dados multisensor para a identificação e o mapeamento de ambientes flúvio-estuarinos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)*, v. 27, p. 57-67.
- Gonçalves, P. C. da S. 2009. Diagnostico geoambiental do município de Pedra Branca do Amapari, Amapá / Dissertação (mestrado) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical. 115 p.
- Green, E P., Clark, C. D., Mumby, P. J., Edwards, A. J., Ellis, A. C. 1998. Remote sensing techniques for mangrove mapping. *International Journal of Remote Sensing* 19:935–956.
- Grimm, A. M., Ferraz, S. E. T., Gomes, J. 1998. Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events. *J. Climate*, 11, 2863–2880, doi: 10.1175/1520-0442(1998)011<2863:PAISBA>2.0.CO;2.

- Guerra, A. J. T. 2005. Processos Erosivos nas Encostas. In: Guerra, A. J. T. & Cunha, S. B. (orgs.). Geomorfologia. Uma atualização de bases e conceitos. Bertrand, Rio de Janeiro.
- Hadlich, G. M., Ucha, J. M. (Coord.) 2007. Apicuns e manguezais na Baía de Todos os Santos, Bahia. Salvador: UFBA/IGEO/Núcleo de Estudos Ambientais. 1 mapa color. Escala 1:100.000.
- Hay, G. J., Castilla, G. 2008. Geographic object-based image analysis (GEOBIA). In: Blaschke T., Lang S., Hay G. J. (eds) object-based image analysis – spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications. Berlin: SpringerVerlag.
- Herz, R. 1991. Manguezais do Brasil. São Paulo. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 227 pp.
- Hogarth, P. 2007. The biology of mangroves and seagrasses. New York, Oxford University press, 273p.
- Ibharim, N. a., Mustapha, M. a., Lihan, T., & Mazlan, a. G. 2015. Mapping mangrove changes in the Matang Mangrove Forest using multi temporal satellite imageries. *Ocean & Coastal Management*, 114, 64–76. <http://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.005>
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). 2016. CLIMA. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home2/index>>. Acesso em: Julho de 2016.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. United Kingdom and New York, 1535 p.
- Jeanson, M., Anthony, E. J., Dolique, F., & Cremades, C. 2014. Mangrove Evolution in Mayotte Island, Indian Ocean: A 60-year Synopsis Based on Aerial Photographs. *Wetlands*, 34(3), 459–468. <http://doi.org/10.1007/s13157-014-0512-7>
- Juarez, R. W. B. 2015. Mineração em Pedra Branca do Amapari (AP) e os aspectos do pós-fordismo na formatação do espaço urbano / Rodson William Barroso Juarez. – 140 f. : il. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) – Universidade Federal do Amapá, Macapá/Orientação: Prof. Dr. Roni Mayer Lomba.

- Kaimowitz, D., Angelsen, A. 1998. Economic models of tropical deforestation: a review. CIFOR – Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia.
- Kathiresan, K., & Rajendran, N. 2005. Coastal mangrove forests mitigated tsunami. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65, 601-606.
- Kathiresan, K., Bingham, B. L. 2001. Biology of mangroves and mangrove ecosystems. *Advances in Marine Biology* 40, 81e251.
- Kirui, K. B., Kairo, J. G., Bosire, J., Viergever, K. M., Rudra, S., Huxham, M., & Briers, R. A. 2011. Mapping of mangrove forest land cover change along the Kenya coastline using Landsat imagery. *Ocean & Coastal Management*, 83, 19–24. <http://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.12.004>
- Kjerfve, B. 1990. Manual for investigation of hydrological process in mangrove ecosystems. UNESCO Publication Ras/86/120. 79 p.
- Lacerda, L. D., Dias F. J. S., Marins, R. V., Soares T. M., Godoy J. M., Godoy M. L. D. P. 2013. Pluriannual watershed discharges of Hg into tropical semi-arid estuary of the Jaguaribe River, NE Brazil. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 24(11): 1719-1731.
- Lang, S., & Tiede, G. D. 2007. Definiens Developer. *GIS-Business*, (9), 34–37.
- Lefebvre, J.P., Dolique F., Gratiot, N. 2004. Geomorphic evolution of a coastal mudflat under oceanic influences: an example from the dynamic shoreline of French Guiana. *Mar. Geol.*, 208: 191-205.
- Lobo, A. 1997. Image segmentation and discriminant analysis for the identification of land cover units in ecology. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 1136.
- Long, J., Napton, D., Giri, C., & Graesser, J. 2014. A Mapping and Monitoring Assessment of the Philippines' Mangrove Forests from 1990 to 2010. *Journal of Coastal Research*, 294(2), 260–271. <http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00057.1>

- Lovelock, C. E., Sorrell, B. K., Hancock, N., Hua, Q., & Swales, A. 2010. Mangrove forest and soil development on a rapidly accreting shore in New Zealand. *Ecosystems*, 13(3), 437–451. <http://doi.org/10.1007/s10021-010-9329-2>
- Magnanini, A. 1952. As regiões naturais do Amapá. *Revista Brasileira de Geografia*: 244-304.
- Margulis, S. 2003. Causas do desmatamento da Amazônia brasileira. Brasília: Banco Mundial.
- Meirelles, P. R. de L. & Mochiutti, S. 2000. Impactos ambientais da bubalinocultura nos campos inundáveis do Amapá. In: Workshop ECOLAB ecossistemas amazônicos, 5., Macapá. Boletins de resumo. Macapá: IEPA. p.57-61.
- Menezes, M. P. M.; Berger, U.; Mehlig, U. 2008. Mangrove vegetation in Amazonia: a review of studies from the coast of Pará and Maranhão States, north Brazil. *Acta Amaz.* [online]. vol.38, n.3, pp. 403-420. ISSN 0044-5967.
- Mialhe, F., Gunnell, Y., & Mering, C. 2013. The impacts of shrimp farming on land use, employment and migration in Tumbes, northern Peru. *Ocean & Coastal Management*, 73, 1–12. <http://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.12.014>
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). 2011. Áreas de Preservação Permanente e Unidades de Conservação & Áreas de Risco. O que uma coisa tem a ver com a outra? Relatório de Inspeção da área atingida pela tragédia das chuvas na Região Serrana do Rio de Janeiro / Wigold Bertoldo Schäffer... [et al.]. – Brasília: MMA. 96 p. : il. color. ; 29 cm. + mapas. (Série Biodiversidade, 41)
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). 2006. Caderno da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA. 128 p. : il. color. ; 27cm.
- Molion, L. C. B., Cavalcanti, I. F. A., Ferreira, M. E. 1987. Influência da circulação atmosférica do Hemisfério Norte na precipitação pluviométrica da Amazônia: um estudo de caso. *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, Salvador, BA.
- Molion, L. C. B. 1987. 'Micrometeorology of an Amazonian rainforest', in: *The Geophysiology of Amazonia*, Dickinson, R.E. (ed.) p. 255-270, UNU, John Wiley and Sons.

- Nascimento Jr., W. R., M. Souza-Filho, P. W., Proisy, C., M. Lucas, R., Rosenqvist, A. 2013. Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 117, pages 83-93, ISSN 0272-7714.
- Monteiro, M. de A. 2003. A ICOMI no Amapá: meio século de exploração mineral. *Novos Cadernos NAEA*. v. 6, n. 2, p. 113 -168, dez. 2003, ISSN 1516-6481.
- NCAR/UCAR. 2016. Climate Data Guide. Acesso em: <https://climatedataguide.ucar.edu/>. Data de acesso: 15 de Março de 2016.
- Nepstad, D., U. H. L., C., Serrão, E. A. 1991. 'Recuperation of a degraded Amazonian landscape: forest recovery and agricultural restoration', *Ambio*, 20:248-255.
- Nepstad, D., Veríssimo A., Alencar, A., Nobre, C., Lima, E., Lefebvre, P., Schelesinger, P., Potter, C., Cochrane, M. & Brooks, V. 1999. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature* 398: 505-508.
- Netto, A. L. C. 2005. Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. In: Guerra, A. J. T. & Cunha, S. B. (orgs.). *Geomorfologia. Uma atualização de bases e conceitos*. Bertrand, Rio de Janeiro.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., Figueiredo, A.G., Rine, J.M., 1991. AmasSeds: an interdisciplinary investigation of a complex coastal environment. *Oceanography* 4 (1), 3-7 <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.1991.14>
- Nobre, C. A., Molion, L. C. B. 1986. Edição Comemorativa de 10 anos. *Revista Climanalise Especial*. Outubro de 1986.
- OBT/INPE. 2016. Projeto Prodes. Acesso em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>. Data de acesso: 10 de Junho de 2016.
- Oliveira, A. F. L., Santos, V. F., Costa Neto, S. V. 2015. Mapeamento de Manguezais a partir de Imagens Óticas de Alta Resolução aplicando a Classificação Orientada a Objeto, Cabo Norte, Amapá. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa, PB. *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. João Pessoa, PB: INPE, 2015. p. 7574-7581.

- Penland, C. & Magorian, T. 1993). Prediction of Niño 3 Sea Surface Temperatures Using Linear Inverse Modeling. *Journal Climate*, 6, 1067–1076, doi: 10.1175/1520-0442(1993)006<1067:PONSST>2.0.CO;2.
- Penland, C., Sardeshmukh, P. D. 1995. The optimal growth of tropical sea surface temperature anomalies, *J. Clim.*, 8, 1999–2024.
- Press, Frank., Siever, R., Grotzinger, J., Jordan, T. H. 2006. Para entender a Terra. 4ed. Porto Alegre, Bookman.
- Prost, M. T. 1997. La mangrove de front de mer en Guyane: ses transformations sous l'influence du système de dispersion Amazonien et son suivi par télédétection. In: *Mangrove ecosystem studies in Latin America and Africa*, KJERFVE B, LACERDA LD & DIOP EHS (Ed.). UNESCO, Paris, 111-126.
- PROVAM. 1990. Programa de Desenvolvimento Integrado do Vale do Araguari-Estado do Amapá. Estudos Básicos: recursos Naturais e Sócio-Economia, 1. Belém, SUDAM/OEA. 189 p.
- Queiroz, L., Rossi, S., Meireles, J., & Coelho, C. 2013. Shrimp aquaculture in the federal state of Ceará, 1970–2012: Trends after mangrove forest privatization in Brazil. *Ocean & Coastal Management*, 73, 54–62. <http://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.11.009>
- RAISG. 2015. Deforestacion en la Amazonía (1970-2013), 48. Acesso em: <www.raisg.socioambiental.org>. Data de acesso: Dezembro de 2015.
- Rebello-Mochel, F. 1997. Mangroves on São Luís Island, Maranhão Brazil. In: *Mangrove ecosystem studies in Latin America and Africa*, KJERFVE B, LACERDA LD & DIOP EHS (Ed.). UNESCO, Paris, 145-154.
- Ricciardulli, Lucrezia & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). 2016. Last modified 15 Sep 2016."The Climate Data Guide: CCMP: Cross-Calibrated Multi-Platform wind vector analysis."Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/ccmp-cross-calibrated-multi-platform-wind-vector-analysis>.
- Rivero, S., Almeida, O., Ávila, S., & Oliveira, W. (2009). Pecuária e desmatamento: Uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. *Nova Economia*, 19(1), 41–66. <http://doi.org/10.1590/S0103-63512009000100003>

- Rodrigues, S. W. P., Souza-Filho, P. W. M. 2011. Use of Multi-Sensor Data to Identify and Map Tropical Coastal Wetlands in the Amazon of Northern Brazil. *Wetlands* (Wilmington, N.C.), v. 31, p. 11-23.
- Ropelewski, C. F., Halpert, M. S. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with el niño-southern oscillation. *Monthly Weather Review*, 115, 1606-1626.
- Sá, R. M. L. E., Ferreira, L. V. 2000. Áreas protegidas ou espaços ameaçados: o grau de implementação e vulnerabilidade das unidades de conservação federal brasileiras de uso indireto. Brasília, Série Técnica III, WWF Brasil, 2000.
- Schaeffer-Novelli, Y., Cintron-Molero, G., Soares, M.L.G., Rosa, T., 2000. Brazilian mangroves. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 3, 561-570.
- Saenger, P., Hegerl, E. J. & Davie, J. D. S. 1983. Global status of mangrove ecosystems. Commission on Ecology Papers No. 3. World Conservation Union (IUCN), Gland, Switzerland.
- Santos, V. F. dos. 2006. Ambientes costeiros amazônicos: avaliação de modificações por sensoriamento remoto/ Tese (Doutorado em Geologia e Geofísica Marinha) – Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- Santos, D. C., Souza Filho, P. W. M., Nascimento Jr., W. R. . 2011. Mapeamento de ambientes da planície costeira de Soure (Ilha de Marajó), a partir de imagens IKONOS: Uma abordagem de classificação orientada a objeto.. In: XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário ABEQUA III Encontro do Quaternário Sulamericano, 2011, Armação do Búzios-RJ.
- Santos, E. S. 2012. Modelagem hidrodinâmica e qualidade da água na foz do Rio Araguari -AP. Dissertação de Mestrado em Biodiversidade Tropical PPGGIO/Universidade Federal do Amapá. 108p.
- Santos, F. A. S. 2010. Taxa de desagregação em Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico sob chuva simulada. Universidade do Estado de Mato Gross - Trabalho de conclusão de curso. 16 p.
- Scapin, J. 2005. Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria – RS. Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Santa Maria.

- Scavia D., Field J. C., Boech D. F., Buddemeier R. W., Burkett V., Cayan D. R., Fogarty M., Harwell, M. A., Howarth R. W., Mason, C., Reed, D. J., Royer, T. C., Sallenger, A. H., Titus, J. G. 2002. Climate change impacts on U.S. coastal and marine ecosystems. *Estuaries* 25: 149-164.
- Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMADS). 2001. *Manguezais: educar para proteger/ Organizado por Jorge Rogério Pereira Alves.* - Rio de Janeiro: FEMAR/SEMADS. 96 p.:il. ISBN 85-85966-21-1.
- Shearman P. 2010. Recent change in the extent of mangroves in the Northern Gulf of Papua, Papua New Guinea. *Ambio* 39: 181-189.
- Silva, M. V., Santos, V. F., Silveira, O. F. M. 2011. Análise Multitemporal de Mudanças nas Ilhas Costeiras do Estado do Amapá Aplicando Dados de Sensores Remotos. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. Anais do XV SBSR. São José dos Campos-SP: MCT/INPE, 2011. v. DVD. p. 8614-8622.
- Silva, C. G., Patchineelam, S. M., Neto, J. A. B., Ponzi, V. R. A. 2004. Ambientes de Sedimentação Costeira e Processos Morfodinâmicos Atuantes na Linha de Costa. In: *Introdução à Geologia Marinha / Organizadores: José Baptista Neto, Vera Regina Abelin Ponzi & Susanna Eleonora Sichel* - Rio de Janeiro: Interciência.
- Silveira, O. F. M., Takiyama, L. R., Costa Neto, S. V., Silva, U. R. L., Thomaz, D. O. 2004. Manguezais Da Ilha de Maracá - Costa do Amapá: testemunhos das modificações na dinâmica costeira.. *Revista do Gerenciamento Costeiro Integrado*.
- Silveira, O. F. M. & Santos, V. F. 2003. Sources and sinks of sediments: the Amapá coast. *In: Workshop Internacional Dynamics of Fluid Mud Layers in Coastal Waters*, Rio de Janeiro-RJ, COPPE/UFRJ.
- Silveira, O. F. M., Santos, V. F. dos. Tardin, A. T., Aguiar, J., Figueira, Z. R. 2002. Relatório PROECOTUR. Estudo de Criação de Unidade de Conservação na Foz do Rio Amazonas. Macapá.
- Son, N., Chen, C., Chang, N., Chen, C., Chang, L., & Thanh, B. 2014. Mangrove Mapping and Change Detection in Ca Mau Peninsula , Vietnam , Using Landsat Data and Object-Based Image Analysis, 1–8.
- Souza Filho, P. W. M. 2005. Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 4, p. 427-435.

- Souza Filho, P. W. M., Martins, E. S. F., Costa, F. R. 2006. Using mangroves as a geological indicator of coastal changes in the Bragança macrotidal flat, Brazilian Amazon: A remote sensing data approach. Elsevier, São Paulo, Brazil. *Ocean & Coastal Management*, v. 49, p. 462-475.
- Souza Filho, P. W. M., & Paradella, W. R. 2002. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data. *Wetlands Ecology and Management*, 10, 123–132.
- Souza Filho, P. W. M., & Paradella, W. R. 2003. Use of synthetic aperture radar for recognition of Coastal Geomorphological Features, land-use assessment and shoreline changes in Bragança coast, Pará, Northern Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 75, 341-356.
- Souza Filho, P. W. M., & Paradella, W. R. 2005. Use of RADARSAT-1 fine mode and Landsat-5 TM selective principal component analysis for geomorphological mapping in a macrotidal mangrove coast in the Amazon region. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 31, 214-224.
- Souza Filho, P. W. M., Souza, E. B., Silva Jr., R. O. ; Nascimento Jr., W. R. ; Mendonça, B. R. V., Guimarães, J. T. F., DallAgnol, R., Siqueira, J. O. 2016. Four decades of landcover, landuse and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. *Journal of Environmental Management* , v. 167, p. 175184.
- Spalding, M., Blasco, F. & Field, C. 1997. *World mangrove atlas*. ISME, Okinawa, 178 pp.
- Spalding, M., Kainuma, M., Collins, L. 2009. *World Atlas of Mangroves*. UK: Earthscan, ISME, ITTO, FAO, UNESCO-MAB, UNEP-WCMC and UNU-INWEH : 336p.
- Suguio, K. 1998. *Dicionário de Geologia Sedimentar e áreas afins*. Editora Bertrand Brasil, São Paulo, 1217 p.
- Szlafsztein, C. F. 2005. Climate Change, sea-level rise and Coastal Natural Hazards: A GIS-Based Vulnerability Assessment, State of Pará, Brazil. *International Workshop on Climate Change And Human Security*, Oslo. 1-31.

- Tartari, D. T., Nunes, M. C. M., Santos, F. A. S., Faria Jr., C. A., Serafim, M. E. 2012. Perda de solo e água por erosão hídrica em Argissolo sob diferentes densidades de cobertura vegetal. *Rev. Bras. de Agroecologia*. 7(3): 85-93 (2012). ISSN: 1980-9735
- Teixeira, S. G. & Souza Filho, P. W. M. 2009. Mapeamento de ambientes costeiros tropicais (Golfão Maranhense, Brasil) utilizando imagens de sensores remotos orbitais. *Rev. Bras. Geof.*[online]. 2009, vol.27, suppl.1, pp.69-82. ISSN 0102-261X. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2009000500006>.
- Tenório, G.S., Souza-Filho, P.W.M., Ramos, E.M.L.S., Alves, P.J.O., 2015. Mangrove shrimp farm mapping and productivity on the Brazilian Amazon coast: Environmental and economic reasons for coastal conservation. *Ocean Coast. Manage.* 104, 65-77.
- Tessler, M., & Goya, S. 2005. Processos costeiros condicionantes do Litoral Brasileiro. *Revista Do Departamento de Geografia*, n. 17, 11–23.
- Trenberth, Kevin & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 02 Feb 2016. "The Climate Data Guide: Nino SST Indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI)." Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>.
- Urech, E. 1955. Esboço do plano de industrialização do Território Federal do Amapá: minérios e siderurgia. Rio de Janeiro: Di Giorgio.
- Vannuci, M. 2002. Os Manguezais e Nós: Uma Síntese de Percepções/Marta Vannucci; versão em português Denise Navas-Pereira - 2º ed. - São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.
- Veríssimo, A., Lima, E., & Lentino, M. 2002. Pólos Madeireiros do Estado do Pará. Belém: Imazon.
- Viers, J., Dupré, B., Gaillardet, J. 2009. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database. *Science of the Total Environment*, Paris, V. 407, p. 853-868.
- Villela, A., Almeida, J. 1966. Obstáculos ao desenvolvimento econômico da Amazônia. *Revista Brasileira de Economia*, v. 20, n. 2 e 3, p. 176-199.

- Vieira, V. F. 2008. Estimativa de perdas de solo por erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica. *Geografia*, 17(1), 73–81.
- Vo, Q. T., Oppelt, N., Leinenkugel, P., & Kuenzer, C. 2013. Remote sensing in mapping mangrove ecosystems - an object-based approach. *Remote Sensing*, 5(1), 183–201. <http://doi.org/10.3390/rs5010183>
- Walter, V. 2004. Object-based classification of remote sensing data for change detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58, 225-238
- Wulder, M. A., Hall, R. J., Coops, N. C., & Franklin, S. E. 2009. High Spatial Resolution Remotely Sensed Data for Ecosystem Characterization. *BioScience*, 54, 511-521.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA

PARECER

Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de **WILSON DA ROCHA NASCIMENTO JÚNIOR**

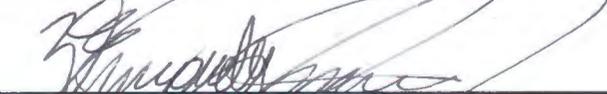
A banca examinadora da Tese de Doutorado de **WILSON DA ROCHA NASCIMENTO JÚNIOR** orientando do Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA), composta pelos professores doutores Venerando Eustáquio Amaro (UFRN), Claudio Fabian Szlafsztain (UFPA), Nils Edvin Asp Neto (UFPA) e Arnaldo de Queiroz da Silva (UFPA), após apresentação da sua tese intitulada “**ANÁLISE DA DINÂMICA DAS ÁREAS DE MANGUEZAL NA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA A PARTIR DE DADOS MULTISENsoRES E HIDROSSedIMENTOLÓGICOS**” emite o seguinte parecer:

O candidato apresentou contribuição relevante ao conhecimento da dinâmica dos manguezais dos estados do Amapá, Pará e Maranhão através de dados de sensores remotos e hidrossedimentológicos. Na apresentação oral, demonstrou segurança e expôs com clareza e uso adequado de recursos didáticos os principais métodos e resultados de sua Tese. O documento encontra-se bem estruturado e tem potencial para gerar publicações de nível internacional. A banca fez sugestões de aprimoramentos de forma e conteúdo e destacou a importância da abordagem de avaliar os processos costeiros a partir da perspectiva da análise de uso e ocupação de bacias hidrográficas. Durante a arguição, o candidato demonstrou domínio sobre os seus dados e capacidade de argumentação científica. Finalmente, ressalta-se que a conclusão da tese ocorreu em 53 meses. Desta forma, a comissão avaliadora considera o candidato aprovado.

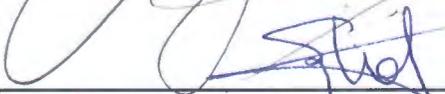
Belém, 16 de dezembro de 2016.



Pedro Walfir Martins e Souza Filho (Orientador - UFPA)



Venerando Eustáquio Amaro (UFRN)



Claudio Fabian Szlafsztain (UFPA)



Nils Edvin Asp Neto (UFPA)



Arnaldo de Queiroz da Silva (UFPA)