

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO  
EM METEOROLOGIA

Aline da Silva Inácio Cavalcante

**ANÁLISE DA MORFODINÂMICA ESTUARINA E VARIAÇÃO DE LINHA DE  
COSTA DO DELTA DO RIO SÃO FRANCISCO**

Maceió, AL  
2019

Aline da Silva Inácio Cavalcante

**ANÁLISE DA MORFODINÂMICA ESTUARINA E VARIAÇÃO DE LINHA DE  
COSTA DO DELTA DO RIO SÃO FRANCISCO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestra em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo

Coorientador: Prof. Me. Lucas Barbosa Cavalcante

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

C376a Cavalcante, Aline da Silva Inácio.  
Análise da morfodinâmica estuarina e variação de linha de costa do delta do rio  
São Francisco / Aline da Silva Inácio Cavalcante. – 2019.  
60 f. : il. color.

Orientador: Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo.  
Coorientador: Lucas Barbosa Cavalcante.  
Dissertação (mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas.  
Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2019.

Bibliografia: p. 57-61.

1. São Francisco, Rio, Bacia. 2. Vazões naturais. 3. RapidEye (Satélites meteorológicos). 4. Sensoriamento remoto. I. Título.

CDU: 528.8



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

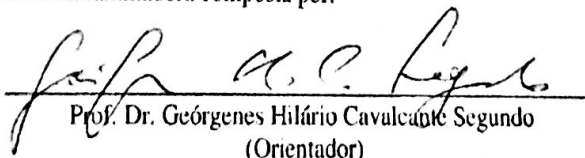
N.º de ordem: MET-UFAL-MS-166.

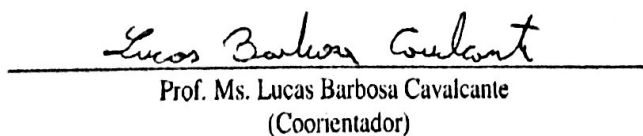
“ANÁLISE DA MORFODINÂMICA ESTUARINA E VARIAÇÃO DE LINHA DE  
COSTA DO DELTA DO RIO SÃO FRANCISCO.”

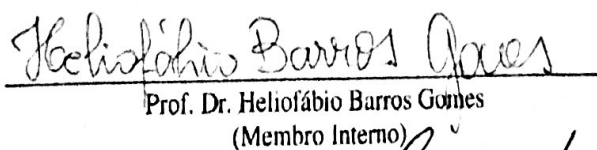
*Aline da Silva Inácio*

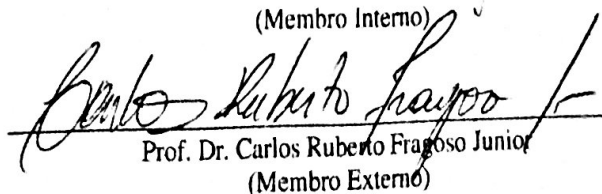
Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

  
Prof. Dr. Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo  
(Orientador)

  
Prof. Ms. Lucas Barbosa Cavalcante  
(Coorientador)

  
Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes  
(Membro Interno)

  
Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Junior  
(Membro Externo)

Setembro/2019

*Este trabalho é dedicado a minha pequena,  
Beatriz Inácio Cavalcante.*

# AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é fruto não apenas de um esforço pessoal, mas também do apoio de diversas pessoas que me deram incentivo intelectual e emocional, direta ou indiretamente, numa das fases mais delicadas da minha vida pessoal. Por esse motivo, registro aqui os meus mais sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador Georgetes Cavalcante, por tudo que me ensinou nessa jornada de mais de dois anos de estudo, por toda a paciência que teve comigo nessa retomada a academia, pelas correções minuciosas de todos os textos que enviei e por toda compreensão que teve com o momento pelo qual passei, justamente na reta final do mestrado. Foi muito bom trabalhar com um profissional extremamente competente e humano.

Ao meu coorientador e também esposo Lucas Cavalcante, por todo companheirismo, amor e conhecimento compartilhado ao longo dessa jornada, todo meu carinho em forma de obrigada, você foi o pilar que me sustentou nos momentos que pensei em desistir.

Aos meus pais, Carlos e Luciana que me deram suporte emocional para seguir a jornada acadêmica.

Aos meus sogros Valdieje e Ronaldo, eles foram peças-chave nesse caminho que percorri até aqui, sempre me apoiando emocionalmente, muitas vezes acreditaram mais em mim que eu.

Aos membros da banca de qualificação e defesa pelas sugestões que tanto contribuíram para a melhoria desta dissertação

À CAPES pela bolsa concedida.

E por fim, sou grata a Deus, pois sem Ele nada seria possível.

*“As pessoas que vencem neste mundo são  
as que procuram as circunstâncias de  
que precisam e, quando não as encontram,  
as criam.”*

*(George Bernard Shaw)*

# RESUMO

O ambiente costeiro não somente pela sua interação natural como também por fatores antrópicos consiste em um ambiente amplamente complexo. Partindo dessa premissa, esta pesquisa tem como objetivo analisar a morfodinâmica estuarina e variação de linha de costa da Foz do Rio São Francisco, analisando as vazões durante o período de dez anos estudados (2009-2018), extraíndo linhas de costa através do processamento do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) e analisando a variação interanual da largura do Delta do São Francisco. Nas análises optou-se por utilizar para estimativa do NDWI as imagens do sensor REIS do satélite *RapidEye*, realizando um procedimento de extração de contorno. Para a extração da linha de costa, aplicou-se um método matemático denominado diferença simétrica, com o intuito de analisar a morfodinâmica estuarina, mostrando as áreas de ampliação e redução da linha de costa. Os resultados encontrados evidenciam que as vazões durante o período de estudo sofreram variações abruptas e podem ser compreendidas através de três ciclos distintos: alta vazão acima de  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$  (2009-2012), período de transição entre  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$  (2013-2015) e baixa vazão abaixo de  $900 \text{ m}^3/\text{s}$  (2006-2018). As linhas de costa sofreram grandes variações com aumentos e diminuição das áreas junto à foz, sendo mais intenso a partir de 2013. A largura do Delta do São Francisco mostrou uma correlação direta com o padrão das vazões e capacidade do rio em transportar sedimento em direção à foz. Durante o período de alta vazão, o sedimento removido pela deriva litorânea junto à foz era naturalmente recomposto pelo material exportado pelo rio, mantendo a largura da do delta estável. Por outra lado, após a redução da vazão, a carga de sedimento em direção à foz reduziu, inibindo a reposição de sedimentos e causando aumento da largura do delta.

**Palavras-chave:** vazão. rapideye. sensoriamento remoto.



# ABSTRACT

The coastal environment not only by its natural interaction but also by factorsAnthropic conditions consists of a complex environment. This research aims to analyze the estuarine morphodynamics and shoreline variation at the São Francisco River mouth. The analyses consist of correlating the ten years of river discharge from between 2009 and 2018, extraction of shorelines by processing the Difference Index(NDWI) and estimating the interannual variation in the width of the São Francisco Delta. NDWI estimation was based on the images of the RapidEye satellite REIS sensor, performing a contour extraction procedure. The analyze of the estuarine morphodynamics is performed through a mathematical method to extract the shorelines. Results found evidence that the flows during the study period suffered abrupt variations and can be partitioned in three distinct cycles: high flow above  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  (2009-2012), the transition period between  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$  (2013-2015) and low flow below  $900 \text{ m}^3/\text{s}$  (2006-2018). The shorelines suffered significant variations with increases and decrease of the areas near the mouth and were more intense from 2013. The width of the São Francisco Delta showed a direct correlation with the flow pattern and river capacity to carry sediment towards the mouth. During the period of high flow, the sediment removed by the coastal drift near the mouth was naturally recomposed by the material exported by the river, keeping the width of the delta stable. On the other hand, after the flow reduction, the sediment load towards the mouth reduced, inhibiting sediment replacement and causing an increase in delta width.

**Keywords:** flow. rapideye. remote sensing.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – (a) Soldado carregando os pombos para o campo de batalha, (b) Pombo-correio com máquina acoplada ao peito. . . . .	23
Figura 2 – Esquema representando os quatro elementos principais da aquisição de sensoriamento remoto. . . . .	25
Figura 3 – Propagação da radiação eletromagnética, em função dos campos elétrico (E) e magnético (M). . . . .	26
Figura 4 – Representação da eliminação de um fóton, provocada pela mudança de órbita de um elétron. . . . .	27
Figura 5 – (a) Representação de um sensor passivo, (b) Representação de um sensor ativo. . . . .	27
Figura 6 – Representação de objetos dentro de um pixel, quando mais de um objeto esta presente, o valor captado é a soma de todas as interações e não do objeto individual. . . . .	28
Figura 7 – Assinatura espectral de alguns alvos encontrados na Terra. . . . .	29
Figura 8 – Representação das diferentes radiações radiométricas. . . . .	30
Figura 9 – Representação da órbita e da disposição da constelação <i>RapidEye</i> . . . . .	31
Figura 10 – Interface inicial do QGIS 3.4.7, codinome Madeira . . . . .	32
Figura 11 – Área de estudo (Delta do Rio São Francisco). . . . .	34
Figura 12 – Sistema Hidráulico do Rio São Francisco . . . . .	35
Figura 13 – Tela inicial do Geo Catálogo da Planet Labs Inc. . . . .	36
Figura 14 – Separação dos tipos de coberturas (água e terra) . . . . .	38
Figura 15 – Extração de contorno . . . . .	39
Figura 16 – Conversão de linhas para polígonos . . . . .	40
Figura 17 – Processo de diferença simétrica . . . . .	41
Figura 18 – Vazões para o período (2009 a 2018) - Estação Própria . . . . .	43
Figura 19 – Vazão (2009 a 2018) e datas das imagens . . . . .	44
Figura 20 – Precipitação mensal por ano estudado . . . . .	45
Figura 21 – Linhas de Costa 2009-2018 . . . . .	47
Figura 22 – Mapa Diferença (2009-2010), (2010-2011) e (2011-2012) . . . . .	48
Figura 23 – Mapa Diferença (2012-2013), (2013-2014) e (2014-2015) . . . . .	49
Figura 24 – Mapa Diferença (2015-2016), (2016-2017) e (2017-2018) . . . . .	50
Figura 25 – Mapa Diferença entre os anos de 2009 e 2018 . . . . .	51
Figura 26 – Local de medida para largura do Delta (sentido Sudoeste-Nordeste) . . . . .	53
Figura 27 – Vazão x Largura . . . . .	54

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alterações a jusante do barramento . . . . .	18
Tabela 2 – Usinas Hidrelétricas instaladas no Rio São Francisco . . . . .	20
Tabela 3 – Características de satélites atuais. . . . .	24
Tabela 4 – Resolução espacial de sensores orbitais e sua relação com a faixa de imageamento. . . . .	28
Tabela 5 – Nomes dos satélites que compõe a constelação <i>RapidEye</i> . . . . .	30
Tabela 6 – Características da constelação <i>RapidEye</i> . . . . .	31
Tabela 7 – Irradiância Solar da Exoatmosfera ( <i>EAI</i> ) . . . . .	37
Tabela 8 – Quantitativo de ampliação e redução por ano de linha de costa . . . .	52
Tabela 9 – Comprimento do delta do São Francisco . . . . .	52

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL	Alagoas
ANA	Agência Nacional de Águas
BA	Bahia
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
EAI	Irradiância Solar da Exoatmosfera
ND	Número digital
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i> (Índice de Diferença Normalizada da Água)
OLI	<i>Operational Land Imager</i> (Imageador Operacional da Terra)
PAN	Câmera Pancromática e Multiespectral
PE	Pernambuco
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RAD	Radiância
REF	Reflectância
REIS	<i>RapidEye Earth Imaging System</i> (Sistema de imagem da Terra RapidEye)
REM	Radiação eletromagnética
SE	Sergipe
Singreh	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SIRGAS2000	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
UTM	Universal Transversa de Mercator
WCS	<i>Web Coverage Service</i> (Serviço de cobertura da web)
WFS	<i>Web Feature Service</i> (Serviço web de feições)
WFS-T	<i>Web Feature Service Transaction</i> (Serviço web de feições - transacionais)

WMS	<i>Web Map Service</i> (Serviço web de mapas)
WMS-C	<i>Web Mapping Service - Cached</i> (Serviço de Mapeamento da Web - em cache)
WMTS	<i>Web Map Tile Service</i> (Serviço web de mapas - em partes)

# LISTA DE SÍMBOLOS

<i>ha</i>	Hectare
<i>MW</i>	Megawatts
<i>m</i>	Metro
<i>E</i>	Este
<i>N</i>	Norte
<i>bits</i>	<i>Binarys Digits</i> (Dígitos binários)
<i>km</i>	Quilômetros

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Efeitos da alteração no sistema de cursos de águas naturais</b>	<b>17</b>
2.1.1	Efeitos hidrológicos, geomorfológicos e sedimentológicos gerais da construção e operação de barragens	17
2.1.1.1	Vazão	18
2.1.1.2	Erosão Fluvial	18
2.1.1.3	Transporte de material	19
<b>2.2</b>	<b>Histórico do sistema hidrelétrico brasileiro e os impactos advindos dos barramentos</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Rio São Francisco</b>	<b>20</b>
2.3.1	Características Gerais	20
<b>2.4</b>	<b>Meio Ambiente e Política Pública</b>	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>Legislação aplicada aos recursos hídricos</b>	<b>21</b>
2.5.1	O Código de Águas de 1934 – Decreto N <sup>o</sup> 24.643/34	21
2.5.2	Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) – Lei N <sup>o</sup> 9.433/97	21
2.5.3	Agência Nacional de Águas (ANA) – Lei N <sup>o</sup> 9.984/00	22
<b>2.6</b>	<b>Sensoriamento Remoto</b>	<b>23</b>
2.6.1	Perspectiva histórica	23
2.6.2	Definição de sensoriamento remoto	24
<b>2.7</b>	<b>Radiação Eletromagnética</b>	<b>25</b>
2.7.1	Modelo Ondulatório	26
2.7.2	Modelo Corpuscular	26
<b>2.8</b>	<b>Sistemas Orbitais e Sensores</b>	<b>27</b>
2.8.1	Resolução espacial	28
2.8.2	Resolução espectral	28
2.8.3	Resolução radiométrica	29
2.8.4	Resolução temporal	30
<b>2.9</b>	<b>Satélites da Constelação <i>RapidEye</i></b>	<b>30</b>
<b>2.10</b>	<b>QGIS</b>	<b>32</b>
2.10.1	Características técnicas do QGIS	32
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Delta do Rio São Francisco</b>	<b>34</b>

3.2	Sistema hidráulico do Rio São Francisco . . . . .	34
4	<b>MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .</b>	<b>36</b>
4.1	Aquisição das imagens do satélite <i>RapidEye</i> . . . . .	36
4.2	Etapas para o cálculo do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) . . . . .	37
4.2.1	Conversão de Números Digitais (ND) para reflectância . . . . .	37
4.2.2	Estimativa do NDWI . . . . .	38
4.3	Extração do contorno da linha de costa . . . . .	38
4.4	Extração das áreas de ampliação e redução . . . . .	39
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>42</b>
5.1	Análise da Vazão x Período de Estudo . . . . .	42
5.2	Morfodinâmica do Delta do Rio São Francisco . . . . .	46
5.2.1	Análise da série temporal (2009 a 2018) da linha de costa . . . . .	46
5.2.2	Análise temporal (2009 a 2018) da morfologia costeira . . . . .	48
5.3	Análises da variação de largura do Delta do Rio São Francisco . . . . .	52
6	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>55</b>
6.1	Recomendações . . . . .	56
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>57</b>



# 1 INTRODUÇÃO

Segundo Oliveira e Melo (2015) o ambiente costeiro constitui uma paisagem que apresenta grande complexidade devido à interação dos elementos físicos (continente, atmosfera e oceano) e antrópicos. Como principais modeladores da paisagem costeira, podem-se destacar as ondas, as correntes litorâneas, o regime de marés, o regime de ventos, a variação do nível do mar, entre outros (BIRD, 2011).

Para Rosati (2005) o equilíbrio da zona costeira é definido pelo sistema continente-atmosfera-oceano e alterações em qualquer um desses vetores propiciam um ambiente instável em seus padrões morfodinâmicos, principalmente ligados aos processos de sedimentação e de erosão.

Suguio (1973) e Perillo, Angeles e Piccolo (1999) afirmam que as fontes de sedimentos mais relevantes para os sistemas fluviais são as derivadas das drenagens da própria bacia, a erosão do fundo, margens e paredes laterais do próprio rio, que se arranjam e configuram a modelagem do canal e da sua desembocadura.

Neste cenário inserem-se as modificações morfológicas e hidrológicas, que segundo Pinheiro e Morais (2010) são influenciadas pelos represamentos dos corpos hídricos. O barramento do leito de Rio, reduz sua vazão, além de reduzir o transporte de material particulado para a desembocadura, contribuindo para o avanço da cunha salina e alteração das configurações de linha de costa.

A foz do Rio São Francisco esta inserido neste meio sendo considerado um ambiente fluvial deltaico, ou seja, terminado em um delta. Segundo Mabesoone (1983) tal estrutura é composta por um conjunto de sedimentos formados pelos materiais arrastados através da corrente fluvial, que em contato com massas permanentes de água e auxílio das ondas acabam se depositando as margens da desembocadura. Associado a este ambiente ocorrem as interferências antrópicas em seu regime hidrológico o que tornam esta área susceptível a impactos ambientais.

Atualmente no São Francisco temos a presença acelerada de erosões costeiras, a qual em sua grande parte relacionasse à retenção de sedimentos fluviais ao longo dos diversos barramentos existentes no decorrer do Rio.

Uma forma importante de perceber esta variação e o impacto ambiental por ela causada é através do estudo da variação da linha de costa, que segundo Suguio (1992) é o limite entre o continente e a porção adjacente ao mar onde não há efetiva ação marinha no alcance máximo das ondas, concretizando-se pela presença de falésias, no limite entre a vegetação e a praia, ou nos costões rochosos, ou por qualquer outra feição que marque

o início da área continental, para Dolan et al. (1980) é definida como a interface entre a terra e a água.

Ambas as definições expressam a instabilidade existente em sua demarcação em função de ser extremamente suscetível às dinâmicas costeiras, que influenciam nas constantes modificações de posicionamento ao passar dos anos. Quando tratamos de todos estes fatores em sistemas fluviais, a instabilidade é ainda maior, uma vez que além de todos os elementos físicos supracitados, apresentam também variações em suas vazões (ESTEVEZ, 2003). Tratando do Rio São Francisco, ainda se tem o agravante das diversas hidrelétricas que são instaladas no decorrer do seu curso principal, que causam uma variação abrupta da descarga fluvial.

Segundo Noernberg (2001) entre estes processos dinâmicos inclui-se ainda o balanço de sedimentos, o qual apresenta destacada importância social e ambiental, alterando assim a morfologia costeira. Segundo Wright (1995), as alterações na morfologia costeira podem ser sintetizadas pelos processos de acumulação (deposição) ou remoção (erosão) de sedimentos.

Diante do exposto a inserção de novas tecnologias para analisar e processar a dinâmica das linhas de costa, se torna indispensável. Analisando o avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas, os sensores imageadores alcançaram um alto patamar na evolução de suas resoluções, sendo cada vez mais precisos e com maior temporalidade de aquisição de dados. Tal fato foi devido ao crescimento de softwares, aliados aos hardwares cada vez mais potentes, resultando na expansão de estudos sobre o tema, através de aplicações do sensoriamento remoto nos processos da superfície terrestre que envolvem o processamento digital de imagens (RIBEIRO; FONSECA; KUX, 2011).

Essas novas ferramentas representam um papel fundamental no monitoramento e na estimativa dos mais variados fenômenos naturais, contribuindo como suporte para as observações das mudanças ambientais e colaborando com a tomada de decisões voltadas ao planejamento ambiental e apresentando ainda uma desoneração do processo de aquisição (MOREIRA, 2010).

Diante do exposto a presente pesquisa tem como objetivo analisar a morfodinâmica estuarina e variação de linha de costa da Foz do Rio São Francisco, tendo como etapas principais:

1. analisar as vazões durante o período de estudo;
2. analisar a morfodinâmica da região, verificando áreas de ampliação e redução da linha de costa;
3. estimar a variação interanual da largura do Delta do São Francisco.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Efeitos da alteração no sistema de cursos de águas naturais

Segundo Cavalcante (2011) existe uma grande consumo (energia, água, alimentos, dentre outros), gerado pelo processo de desenvolvimento social, econômico e cultural de uma nação, culminando por produzir pressões e modificações nos sistemas naturais, principalmente nos recursos hídricos, estuários e zonas costeiras, tendo em vista que, são regiões extremamente sensíveis às intervenções antrópicas.

Esta crise ambiental pode ser considerada partindo de três aspectos básicos: crescimento populacional, demanda de energia e de matérias e geração de resíduos. Para Braga (2005) o desenvolvimento da sociedade, leva ao desenvolvimento tecnológico que, por sua vez, resulta no aumento de resíduos, tanto como matéria, quanto como energia.

Partindo desta premissa, o Brasil desde a década de 70, vem baseando seu modelo de geração de energia, com a construção de grandes barragens, o que resulta em grandes impactos ambientais e sociais, devastando grandes áreas e expulsando um grande número da população.

Nos últimos anos, diversos impactos vem sendo relatados na Região do São Francisco, principalmente na região do Baixo São Francisco, entre os Estados de Alagoas e Sergipe, podendo-se destacar à alteração no regime fluvial, à regularização das vazões do rio e às modificações no comportamento hidráulico e sedimentológico (CAVALCANTE, 2011).

A averiguação destes impactos, tem se evidenciado no uso não sustentável dos ecossistemas hídricos e costeiros, conflitando de forma direta com atividades e intervenções antrópicas.

#### 2.1.1 Efeitos hidrológicos, geomorfológicos e sedimentológicos gerais da construção e operação de barragens

Em condições normais o rio controla a dinâmica de funcionamento do canal, exercendo importantes controles físicos, químicos e biológicos do corpo hídrico. Quando o rio é retido, o regime hidrológico a jusante pode sofrer alterações em parte pela construção do barramento, que regulariza a descarga, em parte também pelas modificações das características dos efluentes originadas das barragens (FONTES, 2002).

A construção de barramentos ao longo de cursos de água acaba com a sequência natural dos rios em pelo menos três setores distintos: primeiro a montante do barramento; segundo no próprio reservatório e em terceiro a jusante do mesmo. Tomando como base a

área de estudo desta pesquisa (Delta do Rio São Francisco) serão apresentados os impactos que ocorrem a jusante dos barramentos (Tabela 1)

Tabela 1 – Alterações a jusante do barramento

Setor da Bacia	Principais Impactos Hidrológicos	Principais Impactos Geomorfológicos
A jusante do barramento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Controle da regularização das descargas;</li> <li>- Redução da carga sólida (sedimentos);</li> <li>- Alteração na estrutura térmica;</li> <li>- Redução do nível piezométrico;</li> <li>- Alteração nas taxas de infiltração;</li> <li>- Menor disponibilidade de água subterrânea.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entalhe no leito do rio, com conseqüente descida do nível de base local;</li> <li>- Descida do nível de base dos afluentes com retomada erosiva (entalhe) dos seus leitos;</li> <li>- Processos de erosão nas margens;</li> <li>- Alteração nos sedimentos de fundo e das margens;</li> <li>- Reajustamento na morfologia do canal pela migração dos setores de erosão e sedimentação;</li> <li>- Processos de deposição nas margens e fundo do leito;</li> <li>- Modificações na dinâmica da foz.</li> </ul>

Fonte: Guerra (2009).

#### 2.1.1.1 Vazão

Segundo Destefani (2005) o escoamento da água é proporcionada de forma mais visível nos Rios, integrante o ciclo hidrológico e recarrega as águas superficiais e subterrâneas. A vazão é uma das principais variáveis que caracteriza um rio, constituindo-se da quantidade de água que passa por uma seção num determinado período de tempo (ANA, 2012).

As vazões são variáveis no tempo e no espaço, esta variabilidade é representada pela subida e descida das águas, correspondendo ao regime fluvial, também denominado de regime de cursos d'água ou hidrológico (DESTEFANI, 2005).

#### 2.1.1.2 Erosão Fluvial

Em uma bacia hidrográfica, as características tipológicas de leito, dos canais, de padrões de drenagens, analisadas em conjunto, promovem uma dinâmica peculiar das águas correntes que, associada a uma geometria e hidráulica, culmina em processos específicos fluviais de erosão, transporte e deposição de materiais (TEIXEIRA; CUNHA, 2008).

Para Silva (2003), a capacidade de erosão das margens de um rio, bem como o transporte e deposição de sedimentos, dependem, entre outros fatores, da vazão e da natureza das correntes fluviais, refletindo em uma condição estável (equilibrada) do canal fluvial. Ou seja, os processos de erosão, transporte e deposição de um sistema fluvial variam no decorrer do tempo, sendo interdependentes, analisando-se de forma macro uma bacia hidrográfica, não se pode considerar os processos (erosão transporte e deposição) separadamente, além de fatores naturais que interferem na dinâmica e funcionamento desse sistema, os antrópicos, também influenciam de forma direta.

### 2.1.1.3 Transporte de material

Segundo Coelho (2008) em um Rio cujas características naturais são preservadas, existe uma dinâmica hidrológica própria que resulta em uma morfologia peculiar. Assim sendo, qualquer alteração na naturalidade do processo, como a construção de um barramento, gera mudanças significativas no seu regime hidrológico, principalmente, a jusante.

De acordo com Medeiros, Segundo e Magalhaes (2015) o aumento da vazão intensifica a velocidade do escoamento fluvial, a capacidade de transporte do rio e a lavagem das margens, o que incrementa o material particulado e dissolvido transportado. Com a construção de um barramento a regularização da vazão reduz a capacidade de transporte, o que amplia os efeitos hidrológicos, geomorfológicos e sedimentológicos no sistema fluvial.

## 2.2 Histórico do sistema hidrelétrico brasileiro e os impactos advindos dos barramentos

As hidrelétricas no Brasil correspondem a 90% da energia elétrica produzida no país. A instalação de barragens para a construção de usinas iniciou-se no Brasil a partir do final do século XIX, mas foi após a Segunda Grande Guerra Mundial (1939-1945) que a adoção de hidrelétricas passou a ser relevante na produção de energia brasileira (PENA, 2019).

Segundo Cavalcante (2011) até o final dos anos 40, à principal responsável pela produção, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil foi a iniciativa privada. A partir dos anos 50, ocorreu um notório avanço no processo de urbanização e de industrialização, ocasionando um crescimento da demanda por energia elétrica e, conseqüentemente, a necessidade de investimentos no setor elétrico.

Ainda segundo Cavalcante (2011) o sistema elétrico do País apresenta quatro grandes sistemas interligados por linhas de transmissão, integrados pelas empresas concessionárias das Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e por concessionárias da Região Nordeste e parte da região Norte. Esteves et al. (2011) afirma que 154 represas de grandes porte existentes no país ocupam área superior a  $18.979 \text{ km}^2$ , sendo uma das maiores, a represa de Sobradinho, localizada no Rio São Francisco, BA, ocupa uma área de  $5.190 \text{ km}^2$ .

O Rio São Francisco possui grande importância, seja do ponto de vista social, econômico e cultural para o Brasil, onde abastece boa parte da região Nordeste, além de gerar energia por meio de hidrelétricas. Segundo CHESF (2019) no Rio São Francisco existem oito hidrelétricas instaladas e operando, que juntas são responsáveis por quase 10.000 MW de potência (Tabela 2).

Tabela 2 – Usinas Hidrelétricas instaladas no Rio São Francisco

Usina	Potência Total Instalada (MW)
Luiz Gonzaga	1.479,6
Apolônio Sales	400,0
Paulo Afonso I	180,001
Paulo Afonso II	443,0
Paulo Afonso III	794,2
Paulo Afonso IV	2.462,4
Xingó	3.162,0

Fonte: adaptado de CHESF (2019).

## 2.3 Rio São Francisco

### 2.3.1 Características Gerais

Segundo Welcomme (1985) a bacia de drenagem do rio São Francisco cobre 7,6% do território brasileiro, ocupa em uma classificação mundial a posição 34<sup>a</sup> de rio de maior vazão ( $2.800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e 31<sup>a</sup> em maior extensão (2.900 km). Do total de sua bacia 36,8% encontra-se no Estado de Minas Gerais. Ao longo das suas margens existem diversas cidades e vilarejos, além de possuir importante função em área de irrigação como as localizadas nas cidades de Petrolina/PE e Juazeiro/BA.

Segundo Paiva (1982) seus afluentes localizados entre as cidades de Barra/BA e Penedo/AL, a margem esquerda do rio e a margem direita, respectivamente, entre Bahia e Própria/SE, são temporários, tendo a maior contribuição através dos afluentes de maior porte: Paraopeba, das Velhas, Paracatu, Urucuia, Corrente e Grande.

A bacia é dividida em quatro segmentos: Alto São Francisco, Médio São Francisco, Submédio São Francisco e Baixo São Francisco, tal divisão segundo Godinho e Godinho (2003) é compreendida da seguinte forma: o alto compreende da nascente até Pirapora, percorrendo uma extensão de 630 km; o médio, com extensão de 1.090 km, estende-se de Pirapora até Remanso; o submédio de Remanso até a cachoeira do Paulo Afonso, com 686 km, e por último, o trecho de 274 km de Paulo Afonso até o delta, denominado baixo.

Devido ao alto adensamento populacional e o crescimento da agricultura localizado as margens dos rios e afluentes, o São Francisco vem sofrendo uma forte pressão antrópica, desde o despejo de esgotos domésticos a resíduos industriais. Segundo Alves, Pompeu e Horizonte (2010) os efeitos da poluição se fazem sentir ao longo de todo o rio, aparecendo com a baixa qualidade e diversos episódios de mortandade de peixes.

## 2.4 Meio Ambiente e Política Pública

De acordo com a Constituição Federal de 1988 meio ambiente é um bem de uso comum do povo e direito de todos, ou seja, meio ambiente é elemento fundamental na interação entre os atores sociais BRASIL (1988). Não obstante a muitos reconhecerem a importância dos recursos naturais, não há consenso de como geri-los, pois poucos tem disposição para arcar com os custos e as possíveis restrições de uso. Diante do exposto Leme (2010) afirma que, tratar de questões ambientais é lidar com conflitos e com política.

Até o início da década de 80, as barragens no Brasil podiam ser construídas sem qualquer avaliação ambiental de seus impactos, mas, em meados da década de 80, os barramentos tiveram que se submeter a procedimentos de análise de seus efeitos socioambientais. Surgindo assim a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), fundamentada pela Lei nº 6.938 de 31 de agosto 1981.

## 2.5 Legislação aplicada aos recursos hídricos

### 2.5.1 O Código de Águas de 1934 – Decreto Nº 24.643/34

Segundo Buss, Baptista e Nessimian (2003) o Código de Águas, instituído pelo Decreto nº 24.643 de 10 de julho de 1934 (BRASIL, 1934) foi o primeiro dispositivo legal voltado exclusivamente para os recursos hídricos. Apesar de ser considerado bem completo o Código das Águas, devido ao período de sua criação tendenciava a privilegiar o setor de energia e navegação (CEDRAZ et al., 2000).

O decreto determina em seu capítulo único, Art. 109: “A ninguém é lícito conspurcar ou contaminar as águas que não consome, com prejuízo de terceiros.” (BRASIL, 1934), prevendo que os infratores paguem pelos trabalhos de salubridade das águas, além de responder um processo criminal.

Para Avanzi, Borges e Carvalho (2009) o referido código representou o marco na legislação brasileira e, se hoje é considerado obsoleto em alguns aspectos, estava adequado aos interesses e necessidades da época de sua criação.

### 2.5.2 Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) – Lei Nº 9.433/97

Em 1997 entrou em vigor a Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), conhecida como a Lei das Águas, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh).

Segundo Avanzi, Borges e Carvalho (2009) a PNRH é a materialização do interesse da população brasileira no cumprimento de uma lei que assegure a sustentabilidade

dos recursos hídricos. Esta lei organiza o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, introduzindo vários instrumentos de política para o setor.

Segundo a Lei das Águas, a Política Nacional de Recursos Hídricos tem seis fundamentos:

Art. 1º A Política Nacional de Recursos Hídricos baseia-se nos seguintes fundamentos:

I - a água é um bem de domínio público;

II - a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;

III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;

IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;

V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;

VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades. (BRASIL, 1997)

Tais fundamentos abordam questões de extrema importância, no primeiro fundamento ao utilizar a expressão “a água é um bem de domínio público”, não se tem direcionamento para que tipo de manancial, logo, seja água de superfície, fluente, emergente, subterrânea todas se tornam de domínio público.

Ao se afirmar que “a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico”, tem-se o reconhecimento da colaboração de tal bem no desenvolvimento econômico-social, e por vincular a instituição de cobrança, induz a seu uso racional.

### 2.5.3 Agência Nacional de Águas (ANA) – Lei Nº 9.984/00

Criada pela Lei Nº 9.984 de 17 de julho de 2000 (BRASIL, 2000), a Agência Nacional de Águas (ANA) é a agência reguladora dedicada a fazer cumprir os objetivos e diretrizes da Lei das Águas do Brasil, a lei Nº 9.433 de 1997.

Segundo ANA (2019b) a agência funciona baseada em quatro pilares de atuação:

**Regulação:** Regula o acesso e o uso dos recursos hídricos de domínio da União, que são os que fazem fronteiras com outros países ou passam por mais de um estado, como, por exemplo, o rio São Francisco.

**Monitoramento:** É responsável por acompanhar a situação dos recursos hídricos do Brasil.

**Aplicação da Lei:** Coordena a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, realizando e dando apoio a programas e projetos, órgãos gestores estaduais e à instalação de comitês e agências de bacias.



**Planejamento:** Elabora ou participa de estudos estratégicos, como os Planos de Bacias Hidrográficas, Relatórios de Conjuntura dos Recursos Hídricos, entres outros, em parceria com instituições e órgãos do poder público. (ANA, 2019b)

## 2.6 Sensoriamento Remoto

### 2.6.1 Perspectiva histórica

O sensoriamento remoto tem o registro de suas origens ligados a criação da câmara fotográfica (1826), visto que tal instrumento foi o primeiro a ser utilizado para capturar informações sem ter contato direto com o alvo. Enquanto ciência o termo sensoriamento remoto tem sua primeira aparição na literatura científica datada de 1960 (NOVO, 2010).

Segundo Figueiredo (2010), assim como em outras tecnologias, o precursor da detecção remota foram às atividades militares, que através do melhoramento das estratégias de combate, pensaram em uma forma de estudar o território inimigo sem que para isso precisasse enviar tropas ao local. Ainda segundo o autor para atender esta demanda foi desenvolvida uma câmara leve e pequena, que tinha como função ser fixada em pombos-correio (Figura 1), que ao serem levados a pontos estratégicos eram soltos e sobrevoavam assim o território inimigo.

Figura 1 – (a) Soldado carregando os pombos para o campo de batalha, (b) Pombo-correio com máquina acoplada ao peito.



Fonte: Cabral (2015)

Com a evolução tecnológica o sensoriamento remoto foi progressivamente avançando, substituindo seus meios transportadores (balões, aviões, satélites, dentre outros) e substituindo os meios de captação através da evolução contínua de seus sensores.

Diante deste cenário, Novo (2010) apresenta que o sensoriamento remoto vem apresentando notório e ascendente progressão, tanto em qualidade, com o crescimento das

informações captadas, quanto em quantidade, através dos diversos satélites que vem sendo lançados.

No momento atual existem diversos satélites que orbitam a Terra, sejam independentes ou em constelações e que encontram-se em operação, rastreando e captando as dinâmicas atmosféricas, oceânicas e terrestres, os sensores a bordo destes satélites podem ser divididos quanto considerados sua capacidade de captura em baixa, média e alta resolução espacial, como exemplos, pode-se citar os satélites da constelação *RapidEye* e *PlanetScope*, como média resolução; *WorldView* e Pleíades de alta resolução e o LANDSAT, baixa resolução, parte das características de alguns destes satélites podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características de satélites atuais.

Nome do satélite	Bandas espectrais	Resolução espacial	Resolução temporal
LANDSAT 8	Coastal aerosol	30 m	16 dias
	Blue	30 m	
	Green	30 m	
	Red	30 m	
	Near Infrared	30 m	
	SWIR 1	30 m	
	SWIR 2	30 m	
	Panchromatic	15 m	
	Cirrus	30 m	
	Thermal Infrared (TIRS) 1	100 m	
	Thermal Infrared (TIRS) 2	100 m	
PlanetScope	Azul	3 m	Diária
	Verde		
	Vermelho		
	Infravermelho próximo		
WorldView 2	Vermelho	2 m	1,1 dias 30° off nadir / 3,7 dias 20° off nadir
	Verde		
	Azul		
	Infravermelho		
	Azul costeiro		
	Amarela		
	Vermelho limítrofe		
	Infravermelho-2		
Pleíades	Pancromática	0,5 m	Diária
	Pancromático	0,5 m	
	Azul	2 m	
	Verde		
	Vermelho		
Infravermelho próximo			

Fonte: adaptado de USGS (2015a), Antunes, Debiasi e Siqueira (2014), GlobalGeo (2015), EngeSat (2015)

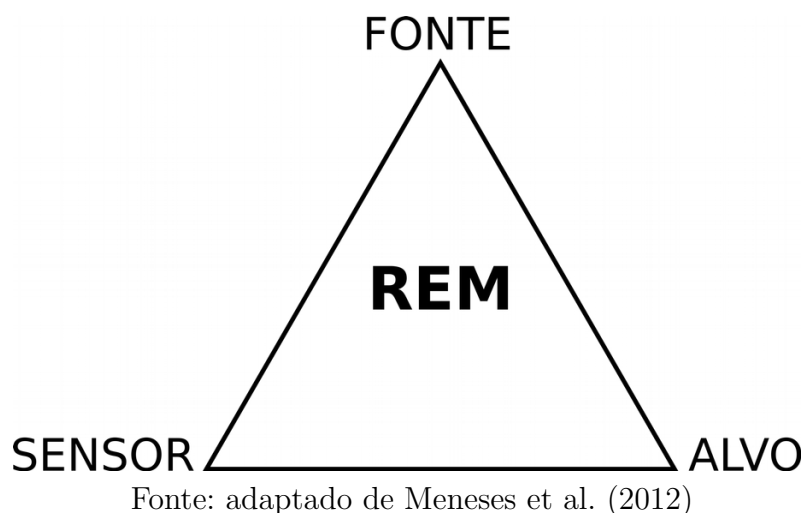
## 2.6.2 Definição de sensoriamento remoto

Seguindo a definição clássica de Avery e Berlin (1992) sensoriamento remoto pode ser compreendido como a ciência e a técnica de obtenção de informações sobre alvos, utilizando-se de instrumentos que não têm contato físico com tais objetos. Para Novo (2010), sensoriamento remoto pode ser entendido como a utilização de sensores para a

aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos sem que haja contato direto entre eles.

Ambas as definições apesar de clássicas desprezam um ponto muito importante para que a obtenção possa acontecer, a radiação eletromagnética (REM), esta energia faz parte da base de existência do sensoriamento remoto, tal energia parte de uma fonte (natural ou artificial), sofre diversas interações com o alvo e é captada e interpretada pelos sensores (Figura 2).

Figura 2 – Esquema representando os quatro elementos principais da aquisição de sensoriamento remoto.



A radiação eletromagnética é o ponto central que permite a comunicação entre o objeto/sensor, funcionando como um meio integrador para a aquisição das informações e tendo sua presença obrigatória para a efetivação do processo de detecção remota.

Com uma definição mais recente Meneses et al. (2012) apresenta o sensoriamento remoto como a ciência que busca o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da captação e medição quantitativa das interações da radiação eletromagnética com os alvos estudados.

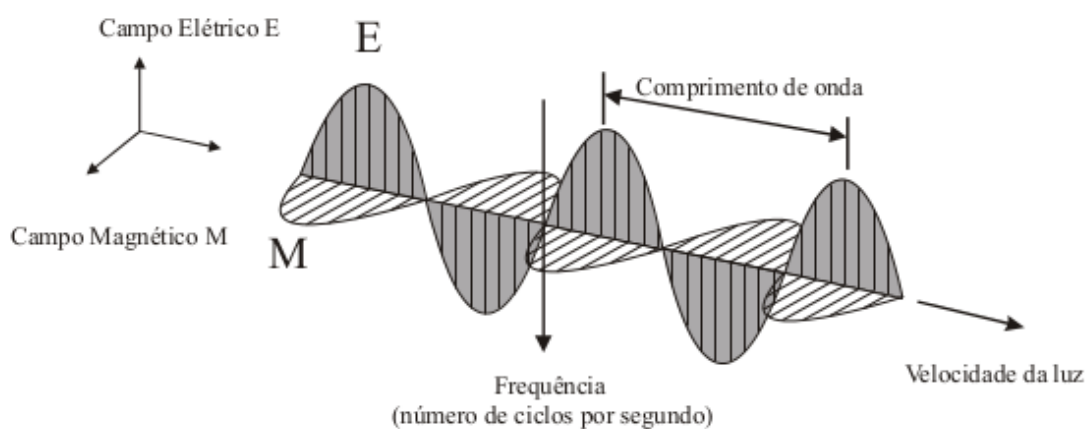
## 2.7 Radiação Eletromagnética

O entendimento da Radiação Eletromagnética (REM) origina-se em dois modelos de comportamento, onde, a REM pode ser entendida como uma propagação em forma de onda (modelo ondulatório) ou uma propagação em forma de energia (modelo corpuscular). É importante ressaltar que a REM independe de meio material para se propagar, ou seja, elas conseguem se propagar no vácuo.

### 2.7.1 Modelo Ondulatório

Segundo Maxwell (1881) o modelo ondulatório parte do princípio de que a uma partícula eletricamente carregada, gera um campo elétrico, que por sua vez, em virtude da agitação da partícula cria um campo magnético, campos estes que vibram ortogonalmente entre si. A partir da aceleração desta partícula, a perturbação causada entre os campos se propaga em direção ortogonal à direção de ambos os campos; denominando-se a esta perturbação, onda eletromagnética (Figura 3)

Figura 3 – Propagação da radiação eletromagnética, em função dos campos elétrico (E) e magnético (M).

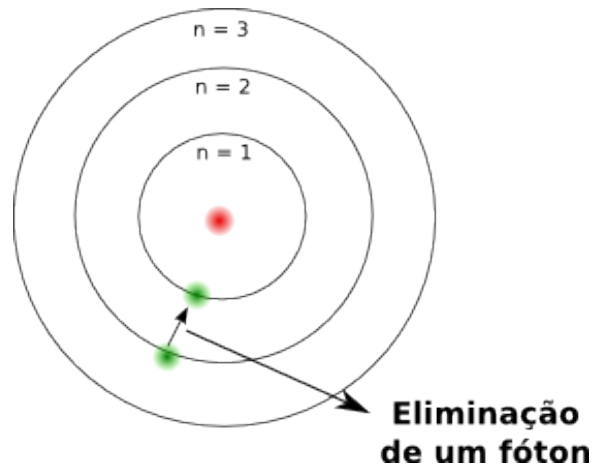


Fonte: adaptado de Meneses et al. (2012)

### 2.7.2 Modelo Corpuscular

Segundo o modelo corpuscular a REM é uma forma dinâmica de energia, se manifestando tão somente quando existiu a interação com a matéria. Segundo Meneses et al. (2012) na medida que a REM atinge uma superfície, ela interage e troca a energia existente com a energia contida nos átomos presentes na matéria que sofre interação. No momento desta troca o objeto estudado absorve um pouco de radiação eletromagnética, provocando assim uma agitação dos átomos, realizando a migração de elétrons e assim a propagação de energia (Figura 4)

Figura 4 – Representação da eliminação de um fóton, provocada pela mudança de órbita de um elétron.



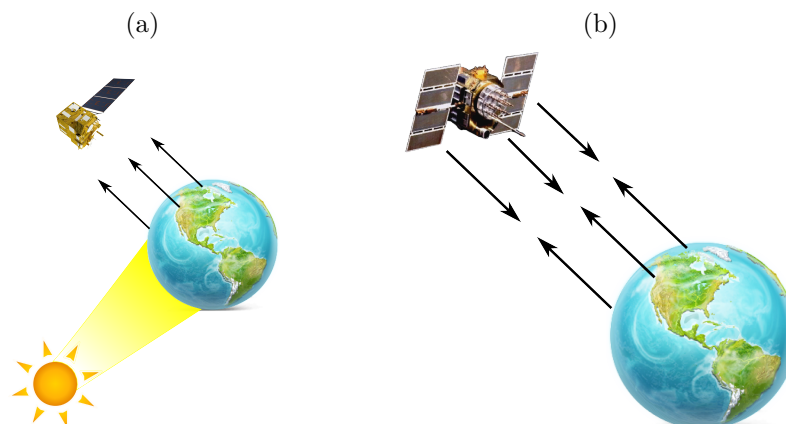
Fonte: Cavalcante (2015)

## 2.8 Sistemas Orbitais e Sensores

Em torno da Terra orbitam atualmente diversas constelações de satélites, os quais continuamente interagem com alvos em sua superfície capturando e enviando informações. Toda esta interação só é possível graças a modernos sensores, que são capazes de captar a REM e transformar em um sinal, tal transformação ocorre através da conversão da REM captada em um valor proporcional de intensidade de energia, emitido por um pulso eletrônico, nomeado número digital (ND).

Os sistemas sensores podem ser divididos segundo a fonte de radiação eletromagnética que se utilizam, ou seja, passivo quando a REM é obtida através do Sol (Figura 5a) e ativo quando a REM é por produção própria (Figura 5b).

Figura 5 – (a) Representação de um sensor passivo, (b) Representação de um sensor ativo.

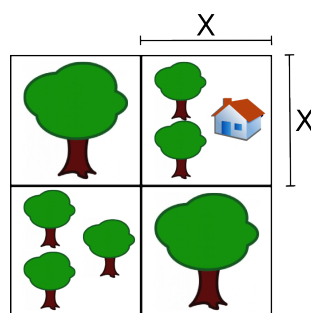


Fonte: Cavalcante (2015)

### 2.8.1 Resolução espacial

Florenzano (2002) definiu resolução espacial como a capacidade que o sensor possui em diferenciar um *pixel*, ou seja, a menor unidade de área imageada na superfície terrestre. Vale ressaltar que a resolução espacial é a responsável pela escala de mapeamento do estudo, pois, é ela que determina o menor objeto que pode ser identificado na análise de imagens. Sendo o *pixel* a representação unitária e indivisível de uma área imageada, qualquer alvo que possua tamanho inferior ao mesmo, é impossível de ser identificado, sendo sua representação a interação de todos os feixes de luz que interagiram com esta unidade de área (Figura 6).

Figura 6 – Representação de objetos dentro de um pixel, quando mais de um objeto está presente, o valor captado é a soma de todas as interações e não do objeto individual.



Fonte: Cavalcante (2015)

A resolução espacial é inversamente proporcional ao campo de visada do sensor, ou seja, quando maior a faixa imageada menor será a resolução espacial (Tabela 4).

Tabela 4 – Resolução espacial de sensores orbitais e sua relação com a faixa de imageamento.

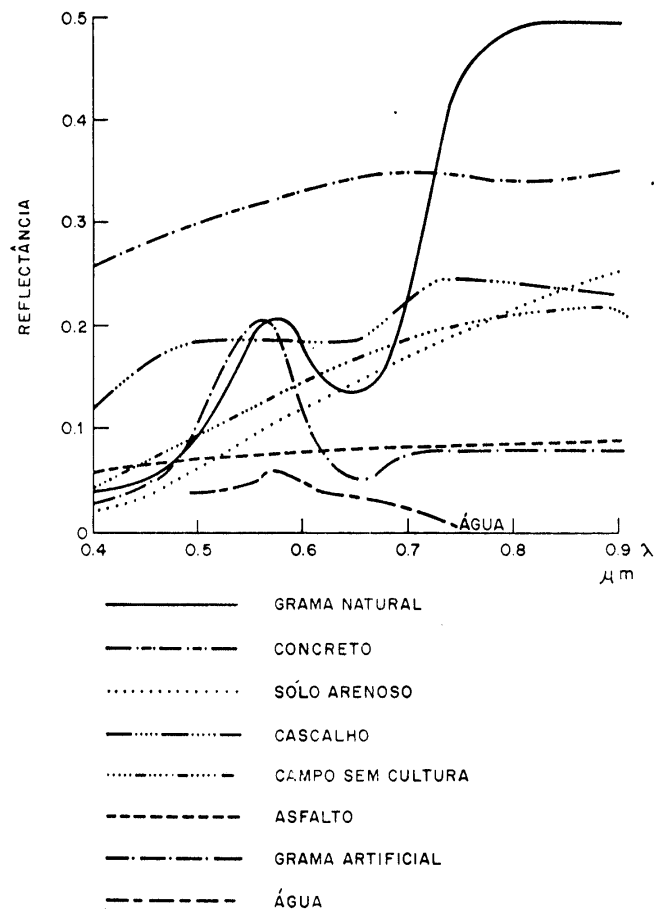
Satélite	Sensor	Largura da faixa imageada	Resolução espacial
Landsat 8	OLI	185 km	30,0 m
RapidEye	REIS	77,25 km	6,5 m
CBERS-4	PAN	60 km	5,0 m
Quick Birk	PAN	16,8 km	0,60 m

Fonte: USGS (2015b), Antunes, Debiasi e Siqueira (2014)

### 2.8.2 Resolução espectral

Cada alvo reflete a energia de maneira distinta, ou seja, possuem diferentes comportamentos espectrais. Este comportamento pode ser estudado analisando-se a assinatura espectral de cada alvo individualmente (Figura 7).

Figura 7 – Assinatura espectral de alguns alvos encontrados na Terra.



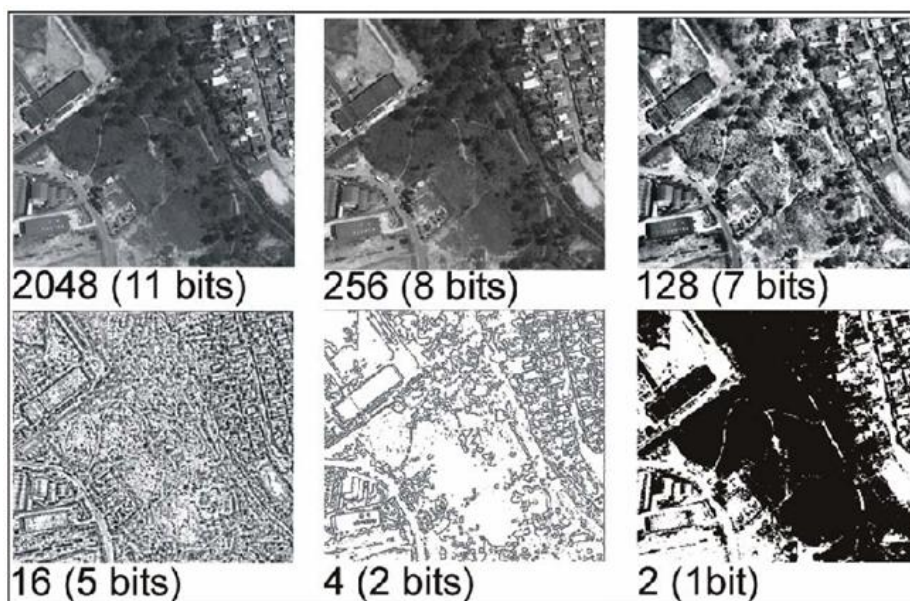
Fonte: INPE (2015)

Segundo Figueiredo (2010) a resolução espectral tem relação com as faixas espectrais que o sensor consegue captar, quanto maior o número de bandas maior a resolução.

### 2.8.3 Resolução radiométrica

A resolução radiométrica faz referência à capacidade do sensor em distinguir as variações da radiância espectral recebida pelo mesmo (SCHOWENGERDT, 1983). A este valor numérico, denomina-se de nível de cinza, que é expresso pela quantidade de bits de uma imagem. Para se conhecer quantos níveis de cinza uma imagem possui, basta elevar 2 ao número de bits da imagem ( $2^8 = 256$ ) (Figura 8) (MELO, 2002).

Figura 8 – Representação das diferentes radiações radiométricas.



Fonte: Melo (2002)

#### 2.8.4 Resolução temporal

Refere-se ao tempo de revisita/passagem de um sensor sobre uma mesma área, sendo de fundamental importância para acompanhar e/ou detectar as evoluções e/ou modificações que ocorrem na superfície terrestre.

## 2.9 Satélites da Constelação *RapidEye*

A constelação *RapidEye* é um sistema Alemão de observação da Terra composto por um conjunto de 5 satélites análogos e que foram colocados em órbita no dia 29 de agosto de 2008 (PLANET, 2019). Cada um dos satélites recebeu um nome grego, os dois primeiros fazem alusão ao nome da missão, os demais remetem as atividades desenvolvidas pelos mesmos (AMSKEPLER, 2019) (Tabela 5).

Tabela 5 – Nomes dos satélites que compõe a constelação *RapidEye*

Satélite	Nome
RapidEye-1	Tachys (Rápido)
RapidEye-2	Mati (Olho)
RapidEye-3	Choma (Terra)
RapidEye-4	Choros (Espaço)
RapidEye-5	Trochia (Órbita)

Fonte: AMSKEPLER (2019).



A grande vantagem que o *RapidEye* possui em relação aos seus concorrentes de mercado é se tratar de uma constelação de satélites e não somente de um equipamento. Segundo Planet (2019) a operação dos satélites foi baseada em três pilares (leveza, agilidade e robustez), sendo este último ponto comprovado pelo peso de apenas 150 kg que cada satélite possui.

Todos os satélites da constelação possuem como carga útil um sensor multiespectral linear *pushbroom* (varredura eletrônica), denominado de REIS (*RapidEye Earth Imaging System*), que é composto por uma câmera atuante em 5 faixas do espectro eletromagnético (Tabela 6), com uma altitude média orbital de 634 km, capacidade de visada lateral e frequência de revisita diária (*off-nadir*) (lateral).

Tabela 6 – Características da constelação *RapidEye*

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral (nm)	Resolução Espacial (m)
REIS	Azul	440 - 510	6,5 m (nível 1B) e 5 m (nível 3A)
	Verde	520 - 590	
	Vermelho	630 - 685	
	<i>Red-Edge</i>	690 - 730	
	Infravermelho próximo	760 - 850	
	<b>Resolução Temporal (nadir) (vertical)</b>	<b>Área Imageada</b>	<b>Resolução Radiométrica</b>
	5,5 dias	77 km	12 bits

Fonte: Planet (2019).

Observasse nas características supracitadas que o *RapidEye* possui uma elevada capacidade de revisita (5,5 dias), o que pode gerar um volume de imageamento de até 6,5 milhões de km<sup>2</sup> de imagens por dia. Toda esta eficácia pode ser explicada pela disposição dos satélites ao redor da Terra (Figura 9), ocupando uma órbita de forma sincronizada e heliosíncrona igualmente espaçada.

Figura 9 – Representação da órbita e da disposição da constelação *RapidEye*.

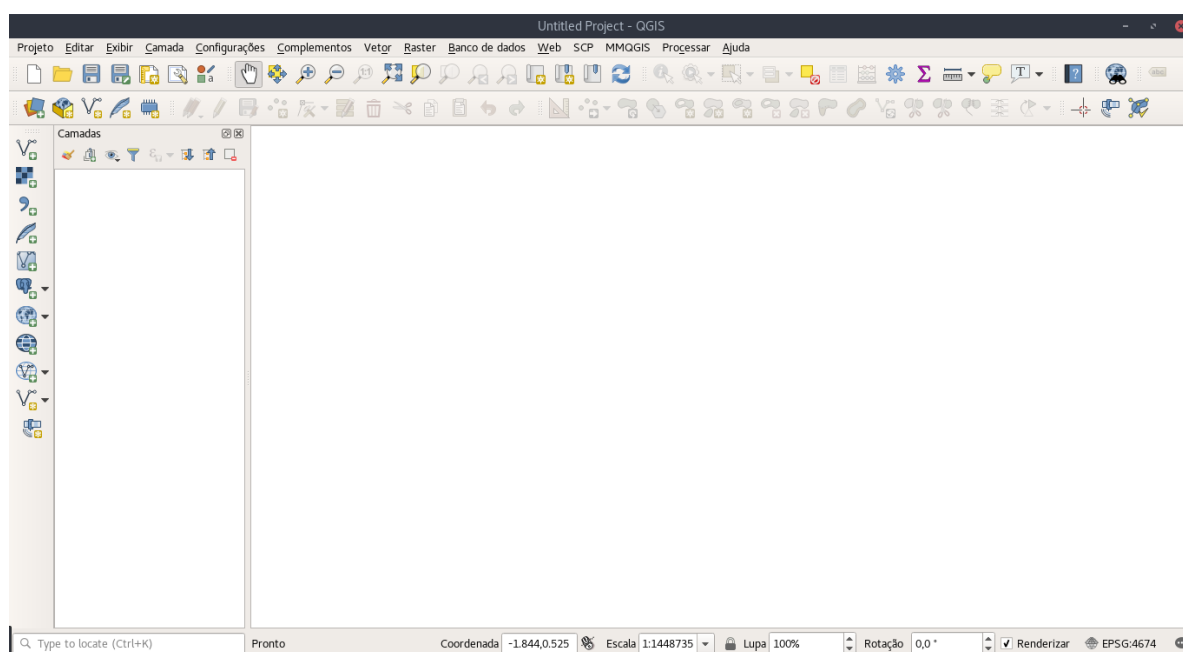


Fonte: elaborado pela autora

## 2.10 QGIS

O QGIS (Figura 10) é um Sistema de Informação Geográfica (SIG), livre e de código aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU. É um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo), e possui instaladores para os sistemas operacionais: Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android, suportando inúmeros formatos de dados vetoriais, matriciais e bases de dados (QGIS, 2019).

Figura 10 – Interface inicial do QGIS 3.4.7, codinome Madeira



Fonte: elaborado pela autora

### 2.10.1 Características técnicas do QGIS

Como característica principal, o QGIS, oferece diversos recursos e ainda a capacidade de acrescentar funcionalidades através da instalação de *plugins*. Abaixo são apresentados um resumo de algumas características técnicas do QGIS e uma breve descrição da mesma.

- Visualização de dados: Pode-se ou sobrepor dados vetoriais e matriciais em Diferentes formatos e projeções sem conversão para um formato interno ou comum;
- Exploração de dados e compositores de mapas: Pode-se compor mapas e interativamente explorar dados espaciais com uma interface gráfica amigável;
- Criar, editar, gerir e exportar dados: Pode-se criar, editar, gerenciar e exportar camadas vetoriais e matricial em vários formatos;
- Analisar dados: Pode-se executar a análise de dados espaciais em bancos de dados espaciais e outros formatos compatíveis com OGR;

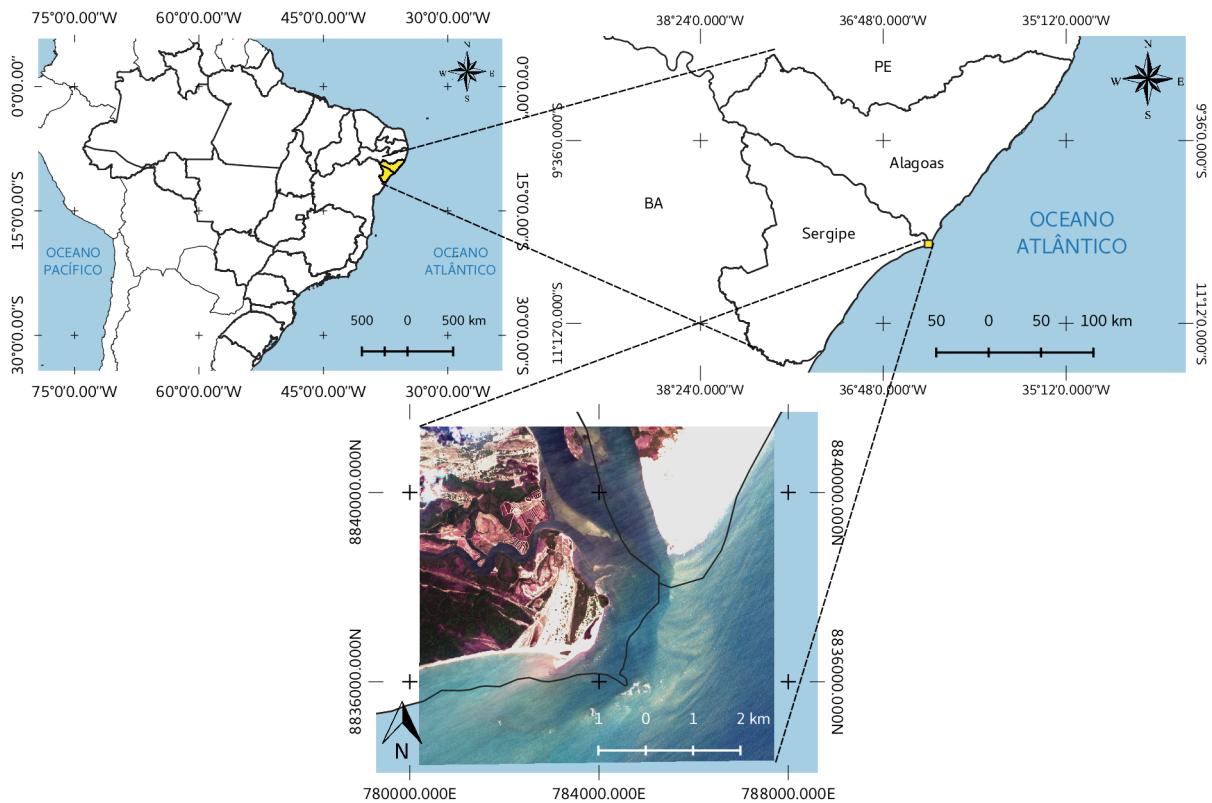
- Publicação de mapas na internet: O QGIS pode ser usado como um cliente WMS, WMTS, WMS-C ou WFS e WFS-T e como um servidor WMS, WCS ou WFS.

## 3 ÁREA DE ESTUDO

### 3.1 Delta do Rio São Francisco

A área de estudo é definida pelo Delta do Rio São Francisco (Figura 11), localizado na divisa entre os Estados de Alagoas e Sergipe, compreendido pelo retângulo envolvente de coordenadas 780227,45 m E, 8836112,73 m N e 787696,19 m E e 8841391,41 m N, referenciadas o datum Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000) e a projeção Universal Transversa de Mercator, fuso 24 S.

Figura 11 – Área de estudo (Delta do Rio São Francisco).



Fonte: elaborado pela autora

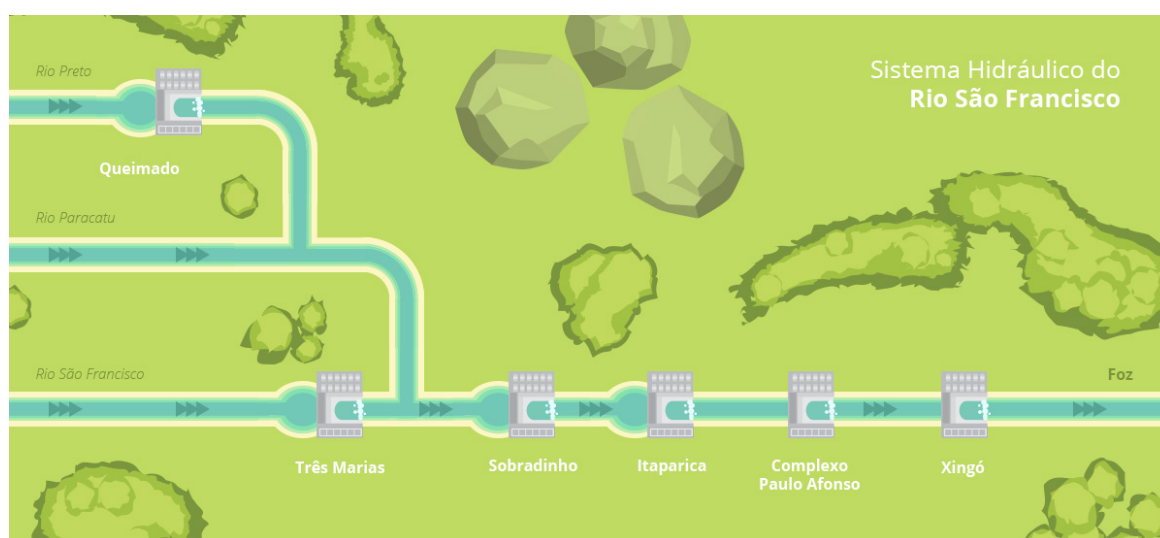
### 3.2 Sistema hidráulico do Rio São Francisco

A Região Hidrográfica do São Francisco abrange 521 municípios em seis estados: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Goiás, além do Distrito Federal. A agricultura é uma das mais importantes atividades econômicas, mas a regularização

das vazões do rio São Francisco proporcionada pelos grandes reservatórios também tem proporcionado maior segurança operacional de diversas captações para abastecimento de água (ANA, 2019c).

Segundo ANA (2019c) a Região do São Francisco tem importante papel na geração de energia elétrica, com potencial instalado, em 2013, de 10.708 MW (12% do total do País). Destacam-se as usinas de Xingó (3.162 MW), Paulo Afonso IV (2.462 MW), Luiz Gonzaga (1.479 MW) e Sobradinho (1.050 MW) (Figura 12). O aproveitamento hidrelétrico do Rio São Francisco representa a base de suprimento de energia do Nordeste.

Figura 12 – Sistema Hidráulico do Rio São Francisco



Fonte: ANA (2019c)

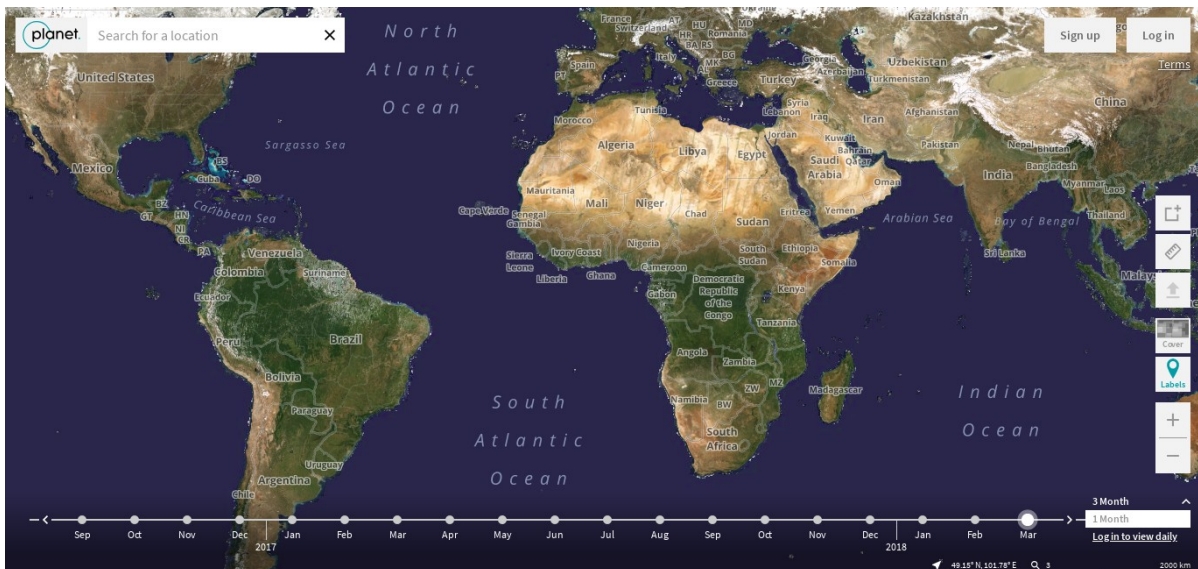
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Aquisição das imagens do satélite *RapidEye*

As imagens utilizadas nesta pesquisa são referentes aos dias 21/03/2009, 27/10/2010, 15/03/2011, 20/01/2012, 06/10/2013, 24/06/2014, 10/04/2015, 07/10/2016, 15/05/2017 e 09/03/2018, obtidas pelo sensor REIS (*RapidEye Earth Imaging System*) do satélite RapidEye, compreendendo dez anos de análise. As referidas datas foram escolhidas, visando sempre encontrar cenas que possuísem 0% de nebulosidade sobre a área de estudo, apesar de não representar o período de doze meses entre as datas, para analisar a variação da morfodinâmica estuarina as imagens mostraram com boa representatividade, tendo em vista que não se tem grandes variações de vazão no decorrer dos meses.

Foram adquiridas junto ao geo catálogo da empresa Planet Labs Inc. (PLANET, 2019) (Figura 13), são referentes ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000) e a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 24 S. O satélite RapidEye possui uma média resolução espacial (5 metros), o que para o estudo proposto potencializa a extração das linhas de costa.

Figura 13 – Tela inicial do Geo Catálogo da Planet Labs Inc.



Fonte: Planet (2019)

As imagens do sensor REIS adquiridas referem-se ao produto nível 3A, tais imagens já possuem correção geométrica e ortorretificação, foram escolhidas tendo em vista sua média resolução espacial de 5 m, que permite uma delimitação de linha de costa bem definida e também por possuir acesso para pesquisa de forma gratuita, o que desonera

o processo. Todas as etapas posteriores a aquisição foram processadas utilizando-se do *software* livre e de código aberto QGIS, em sua versão 3.4.7, codinome Madeira, rodando em um sistema operacional também livre o Debian versão 9.

## 4.2 Etapas para o cálculo do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI)

### 4.2.1 Conversão de Números Digitais (ND) para reflectância

Como etapa inicial ao processamento das imagens do RapidEye esta a conversão dos números digitais (ND), para radiância espectral, ou seja, a energia proveniente do Sol que é refletida por cada pixel em uma determinada unidade de área, tempo e ângulo. A radiância espectral foi calculada conforme a Equação 4.1 (EDUARDO; SILVA, 2013):

$$RAD_i = DN_i \cdot radiometricScaleFactor_i \quad (4.1)$$

Sendo  $RAD$  correspondente ao valor da radiância,  $i$  é o número da banda espectral e  $radiometricScaleFactor$  é um fator de escala, corresponde a  $9.999999776482582 \cdot 10^{-3}$ , para as imagens RapidEye, todas as informações podem ser encontrado no arquivo XML que acompanha a imagem.

Posterior ao calculo da radiância, calcula-se a reflectância no topo da atmosfera conforme Equação 4.2 (EDUARDO; SILVA, 2013):

$$REF_i = RAD_i \cdot \frac{\pi \cdot SunDist^2}{EAI_i \cdot \cos(SolarZenith)} \quad (4.2)$$

$REF$  é o valor da reflectância,  $i$  o número da banda espectral,  $SunDist$  é o valor do inverso do quadrado da distância Terra-Sol, em unidades astronômicas;  $EAI$  é a irradiância solar na exoatmosfera (Tabela 7) e  $SolarZenith$  é o ângulo solar zenital ( $90^\circ - elevaçãosolar$ ).

Tabela 7 – Irradiância Solar da Exoatmosfera ( $EAI$ )

<b>Bandas</b>	<b>Irradiância Solar da Exoatmosfera (<math>EAI</math>)</b>
Banda 1	1997,8
Banda 2	1863,5
Banda 3	1560,4
Banda 4	1395,0
Banda 5	1124,4

Fonte: BLACKBRIDGE (2015).

### 4.2.2 Estimativa do NDWI

Segundo McFeeters (1996) o NDWI é um índice espectral de água pela razão entre a subtração da reflectância das bandas do verde (G) e do infravermelho próximo (NIR) e a soma das mesmas bandas, Equação 4.3.

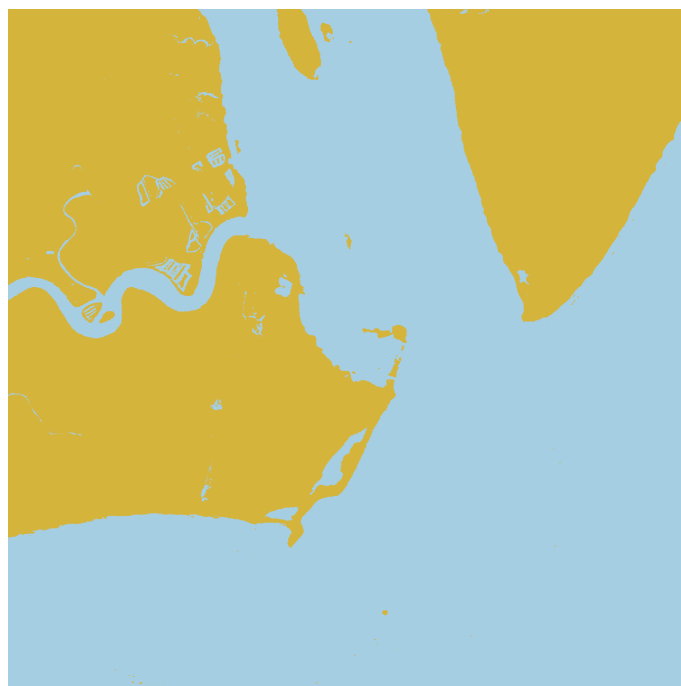
$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR} \quad (4.3)$$

Em que G é a banda do verde, que compreende a banda 2 do RapidEye e NIR é a banda do infravermelho próximo, que compreende a banda 5 do RapidEye. O índice mede o espectro de água, possuindo valores entre -1,0 e 1,0; McFeeters (1996) definiu o limiar da estimativa em 0,0; definindo os valores que NDWI for maior ou igual a 0 como cobertura de água e não água para valores de NDWI menores ou iguais a 0.

### 4.3 Extração do contorno da linha de costa

No processo de extração das linhas de costa, foi realizado um processo denominado fatiamento em classe, onde o valor de NDWI estimado foi convertido em classe de NDWI a partir da transformação ( $NDWI \leq 0 = \text{"Não Água"}$  e  $NDWI \geq 0 = \text{"Água"}$ ), com esta operação obteve-se uma separação dos tipos de coberturas aquáticas e terrestres (Figura 14).

Figura 14 – Separação dos tipos de coberturas (água e terra)



Fonte: elaborado pela autora



O procedimento visto na Figura 14 foi realizado para os dez anos em estudo, período de 2009 a 2018. Com os resultados do fatiamento e objetivando simplificar as feições e evidenciar melhor a linha de costa, foi realizado um extração de contorno onde o arquivo *raster* fatiado foi convertido em linhas (Figura 15), onde foi realizado uma limpeza de feições e em seguida o procedimento de conversão de linhas para polígonos (Figura 16), finalizando assim o processo de extração das linhas de costa.

Figura 15 – Extração de contorno



Fonte: elaborado pela autora

#### 4.4 Extração das áreas de ampliação e redução

As áreas de ampliação e redução foram extraídas a partir do método matemático denominado diferença simétrica, que corresponde ao conjunto de todos os elementos que pertencem à união dos polígonos envolvidos, porém, não pertencem a interseção dos mesmos (Figura 17), todo o processo foi realizado através do *software* QGIS.

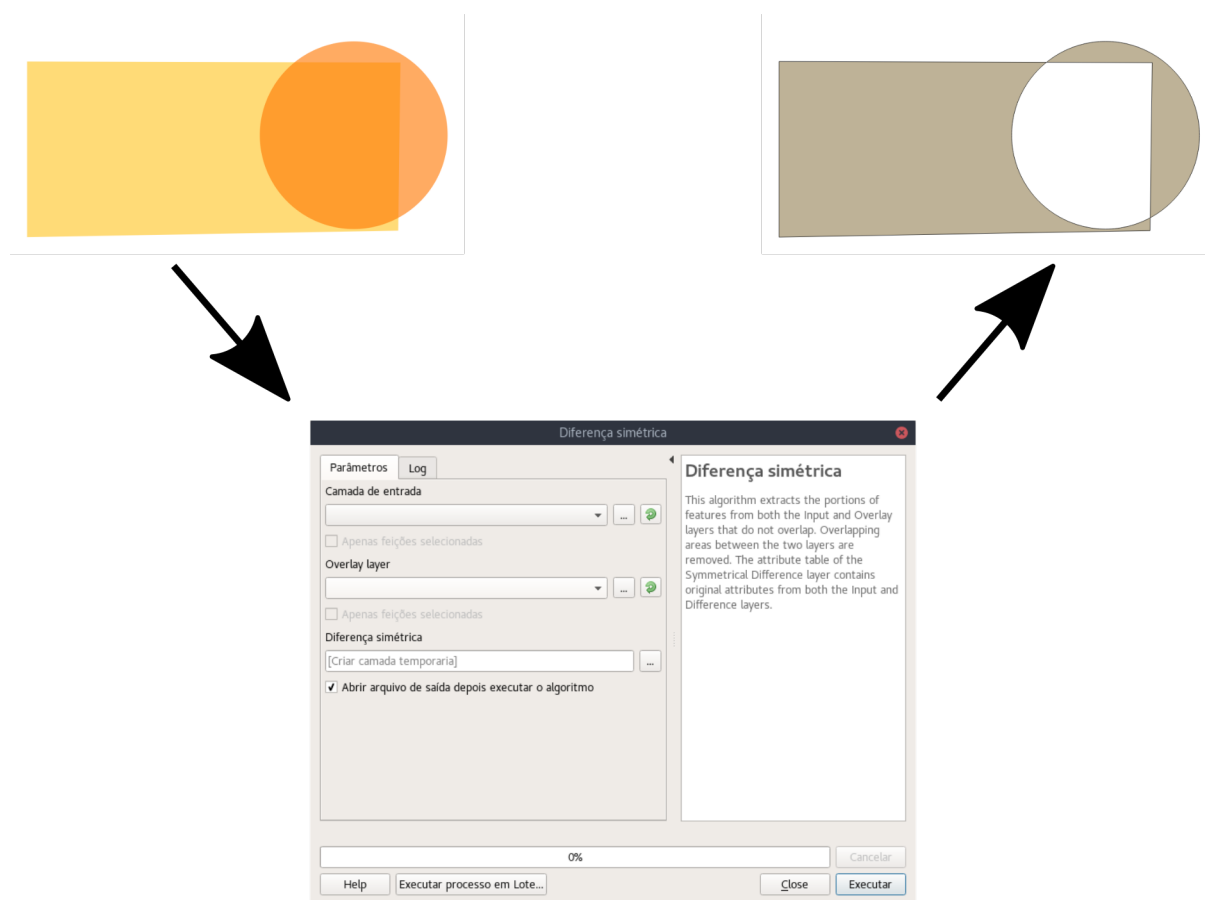
Com o intuito de melhorar a visualização da informação foram atribuídas as cores vermelha e verde para as áreas de redução e ampliação, respectivamente.

Figura 16 – Conversão de linhas para polígonos



Fonte: elaborado pela autora

Figura 17 – Processo de diferença simétrica



Fonte: elaborado pela autora

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo foi dividido em quatro seções visando melhor visualizar os objetivos propostos nesta pesquisa, primeiramente foi realizada a análise da vazão durante o período estudado, na segunda seção são apresentados os resultados das linhas de costas extraídas através da estimativa do NDWI, posteriormente, foram realizadas as análises das áreas de ampliação e redução de linha de costa e por fim analisou-se a variação da largura do Delta do Rio São Francisco.

### 5.1 Análise da Vazão x Período de Estudo

Desde 2012 a bacia do Rio São Francisco vem enfrentando períodos de seca, que reduziu a precipitação para valores muito abaixo da média histórica para a região e, como consequência, à uma redução significativa das vazões afluentes aos reservatórios das hidrelétricas no decorrer da bacia.

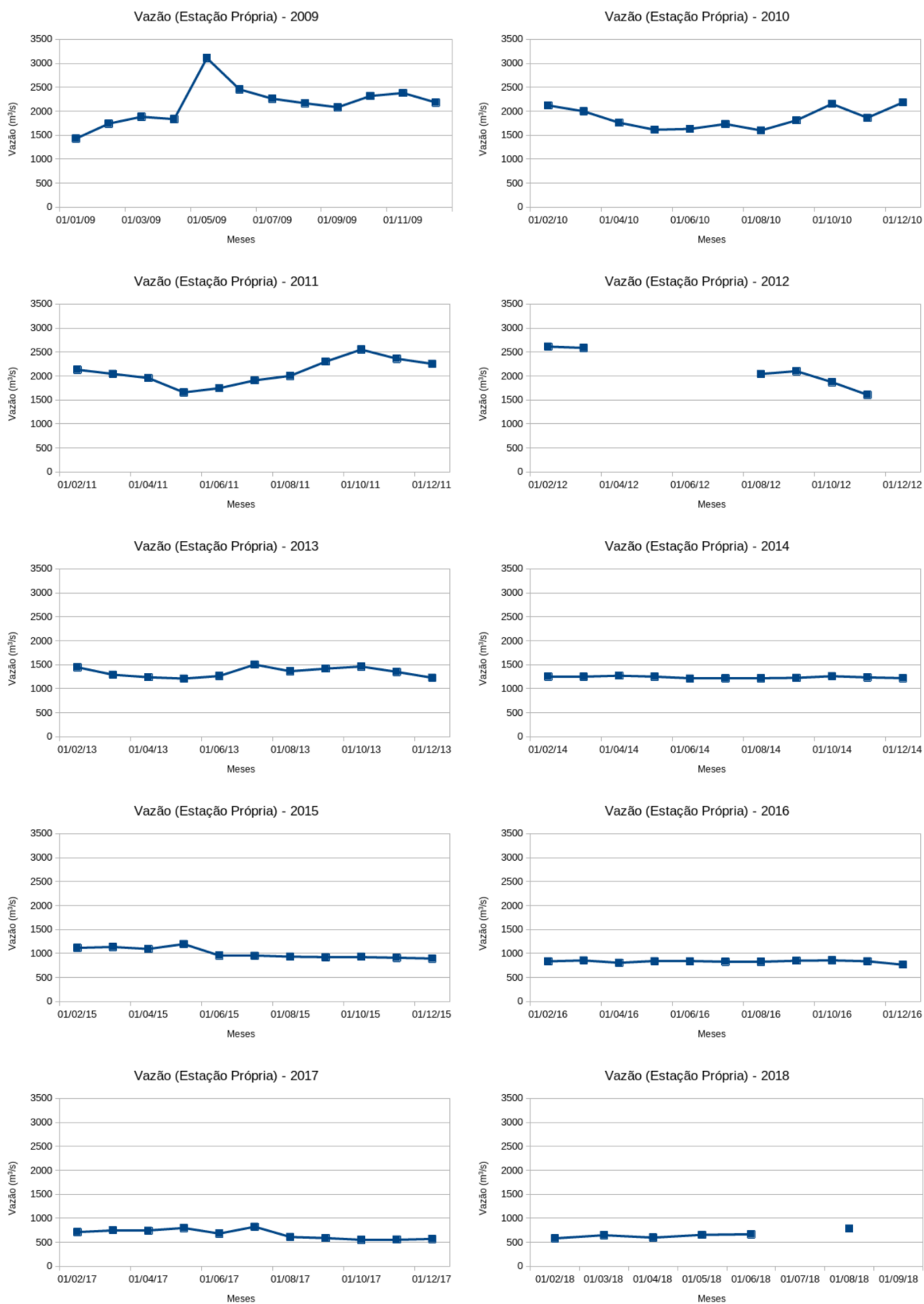
A constante necessidade de se preservar o estoque mínimo de água nos reservatórios para o atendimento de múltiplas, em particular o abastecimento de de várias núcleos urbanos, tem elevado o número de Resolução emitidas pela ANA, com ações autorizando a redução das vazões mínimas liberadas pelos reservatórios.

A escolha pelo período de estudo de 2009 a 2018 visa separar as análises das linhas de costa encontradas em dois períodos, sendo o primeiro de 2009 a 2012 abrangendo um período onde a vazão liberada era superior a  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$  e durante o processo de gestão da seca, que compreende ao ano de início da redução 2013 até 2018, compreendendo seis anos de análise sobre reduções contínuas da vazão.

Na Figura 18 são apresentadas as médias das vazões por meses do ano, pode-se perceber que até o ano de 2012 a vazão apresentava valores superiores a  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ , nos anos de 2013 e 2014 houve uma redução de  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ , passando a apresentar uma média de  $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Até maio de 2015 a vazão praticada era de  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , em junho do mesmo ano foi autorizada pela ANA sua redução para  $900 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Em 06 de novembro de 2017 através da Resolução N° 1.943 a Agência Nacional de Águas autoriza a redução da descarga mínima defluente dos reservatórios de Sobradinho e Xingó para uma média diária de  $550 \text{ m}^3/\text{s}$  até 30 de abril de 2018. Este mesmo ato de autorização com a mesma média de vazão, foi ratificada em 2018 e 2019 através das Resoluções N° 90 de 2018 e N° 19 de 2019.

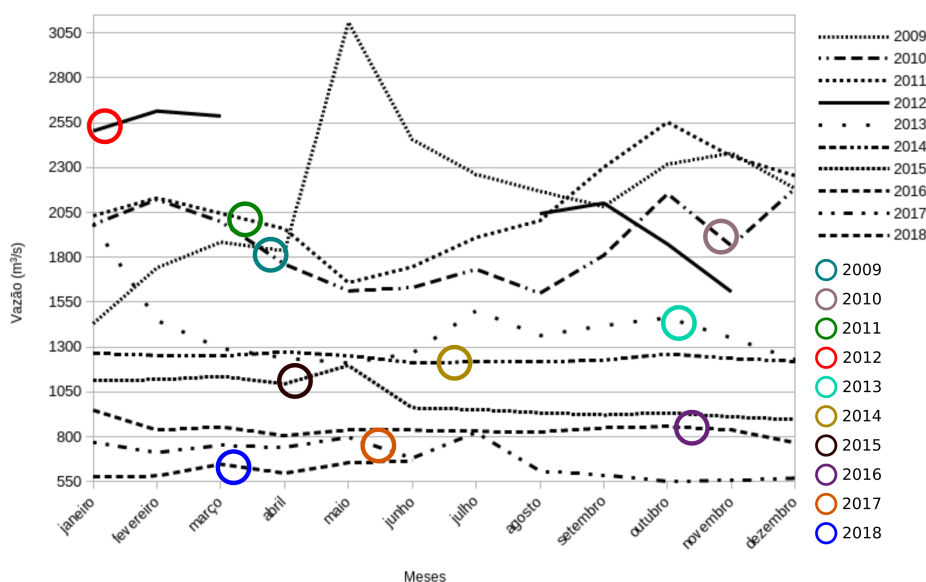
Figura 18 – Vazões para o período (2009 a 2018) - Estação Própria



Fonte: dados extraídos de (ANA, 2019a) e elaborado pela autora

Na Figura 19 é apresentado o gráfico contendo todos os anos de estudo agrupados, assim como as datas das imagens analisadas. Considerando os dois períodos que foram separados para comparação em função do regime da vazão, neste caso, acima de  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$  (2009-2012) e abaixo (2013-2018), respectivamente. Observa-se uma redução inicial de aproximadamente  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  entre o mês de janeiro de 2012 ( $\sim 2.550 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e 2013 ( $\sim 2.050 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Neste mesmo ano de 2013, entre os meses de janeiro a março ocorreu uma redução drástica da vazão de  $\sim 2.050 \text{ m}^3/\text{s}$  para  $\sim 1.300 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente. Comparando com o mesmo trimestre em 2012 (vazão média em torno de  $2.550 \text{ m}^3/\text{s}$ ), a redução foi de aproximadamente  $1.250 \text{ m}^3/\text{s}$  (vazão em março de 2013 era de  $\sim 1.300 \text{ m}^3/\text{s}$ ), ou seja, uma redução de praticamente 50% em apenas um ano.

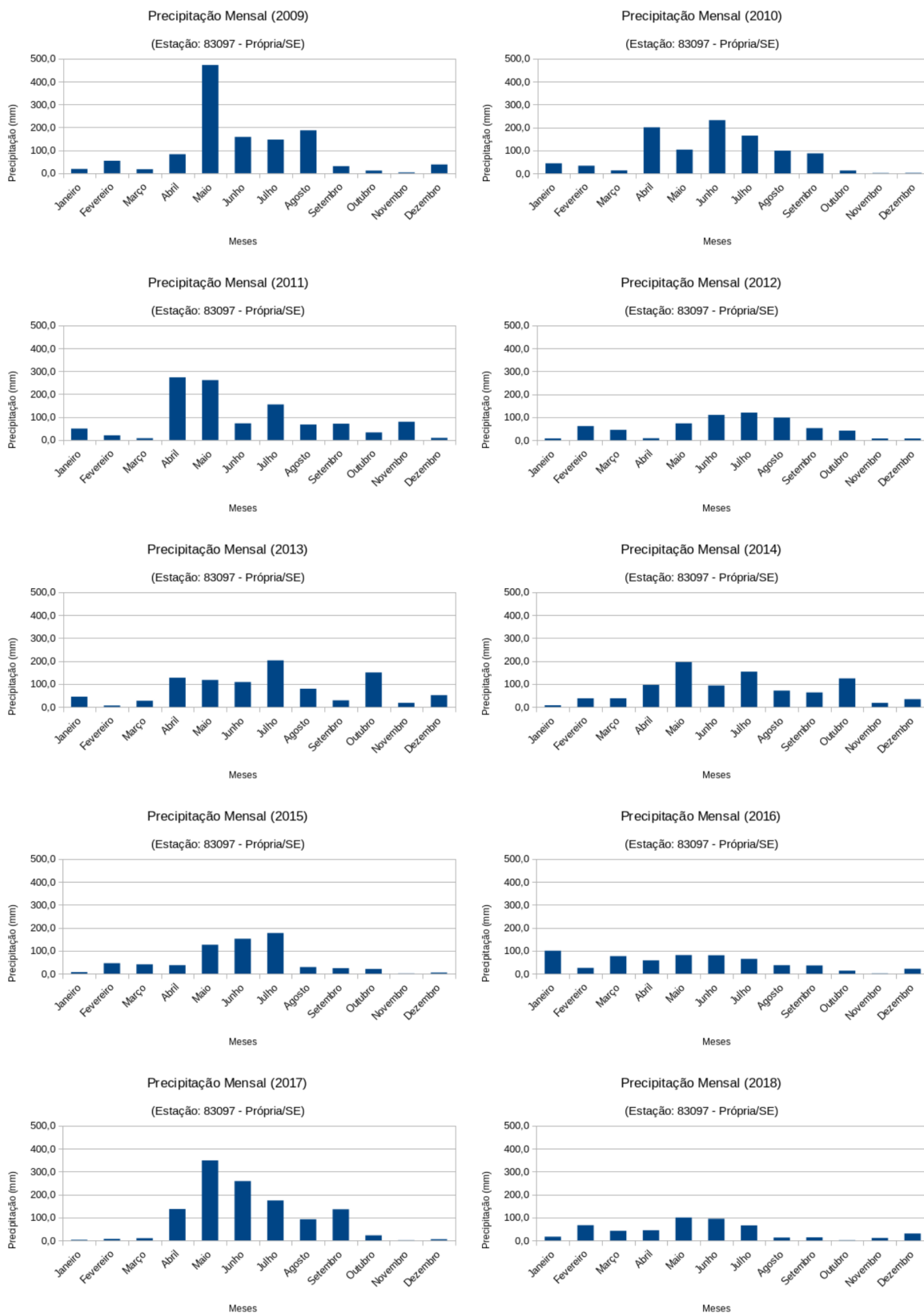
Figura 19 – Vazão (2009 a 2018) e datas das imagens



Fonte: elaborado pela autora

Apesar do controle artificial das descargas ao longo do rio São Francisco, o regime de chuvas desempenha um papel fundamental no padrão da vazão que atinge a porção final do rio, conhecida como baixo São Francisco. Desta forma, a Figura 20 representa a variabilidade da precipitação mensal ao longo dos anos. Comparando novamente os períodos acima de  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$  (2009-2012) e abaixo (2013-2018) observa-se que no período que compreende os anos de 2009 e 2012 as precipitações ultrapassaram os  $200 \text{ mm}$ , tendo em maio de 2009 um valor acima do padrão ( $400 \text{ mm}$ ). Entre os anos de 2013 e 2016 as precipitações tiveram valores entre  $100$  e  $200 \text{ mm}$ , sendo os meses de maio a agosto a registrarem maior volume. O ano de 2017 apresenta valores acima de  $300 \text{ mm}$  para o mês de maio e entre  $100$  e  $200 \text{ mm}$  entre junho e agosto, sendo um ano com chuvas acima da média para várias regiões do país. Em 2018 houve uma redução drástica do volume precipitado, obtendo valores abaixo de  $100 \text{ mm}$ , durante todos os meses do ano.

Figura 20 – Precipitação mensal por ano estudado



Fonte: elaborado pela autora

## 5.2 Morfodinâmica do Delta do Rio São Francisco

Nesta etapa foram avaliadas as respostas encontradas para as linhas de costa extraídas através do NDWI, estimadas através de imagens da constelação *RapidEye*. A análise ocorreu por meio da criação de mapas temáticos representando as feições encontradas para os 10 anos em estudo, visando verificar as alterações ocorridas. Assim com foram analisadas as reduções e ampliações encontradas no período estudado.

### 5.2.1 Análise da série temporal (2009 a 2018) da linha de costa

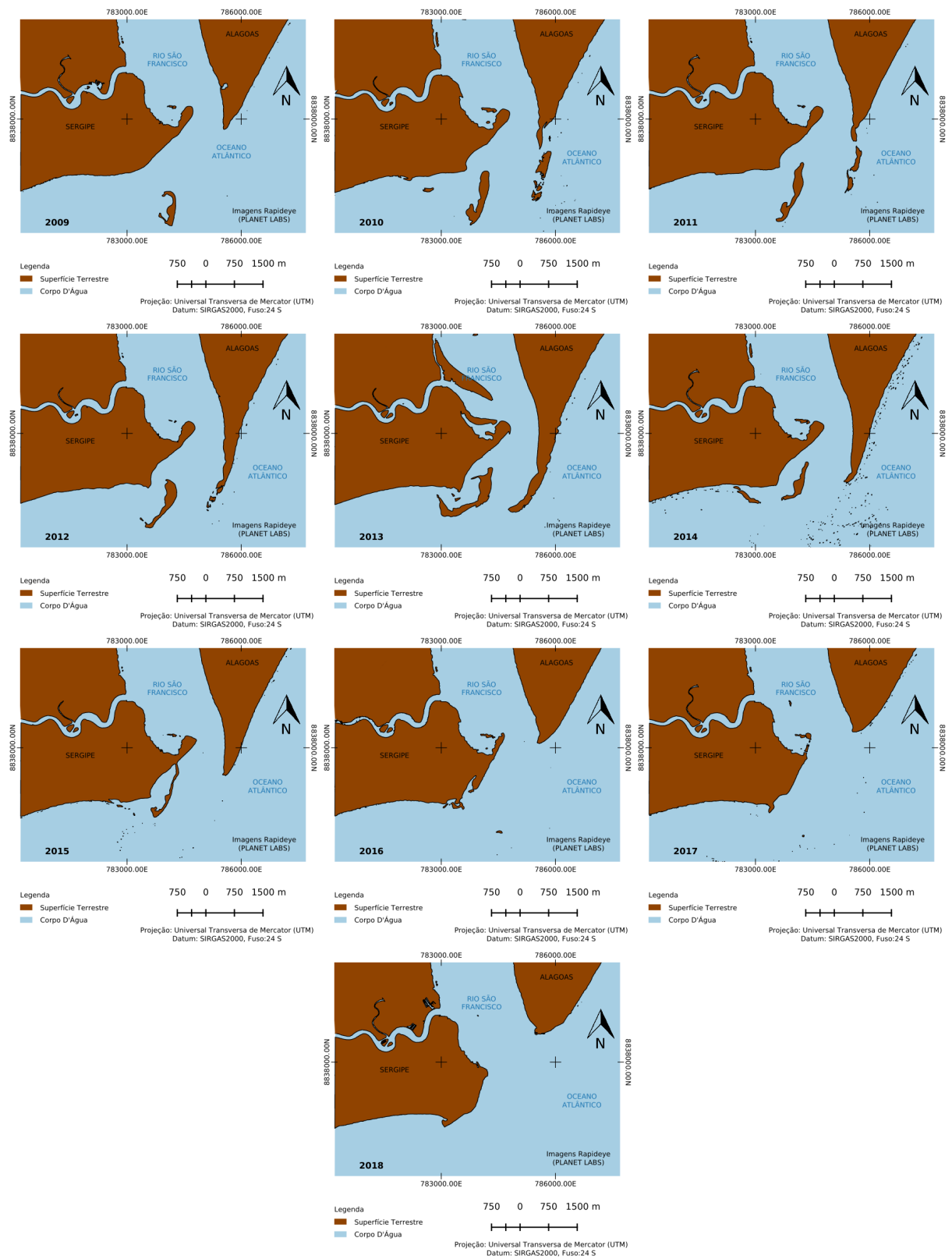
Na Figura 21 é apresentada a séria temporal da linha de costa. Durante este período de alta vazão (2009-2012) com descarga superior à  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$  é observado uma variação mínima no avanço ou retração da linha de costa. Considerando esta vazão elevada durante todo o ano, o transporte de dos sedimentos do leito do rio em direção ao delta é facilitado, repondo o material removido da foz pela deriva litorânea. Como resultado, o balanço entre o material removido e repostado é positivo, pois a vazão permite exportar mais do que é retirado.

Para os anos de 2013 a 2015 temos um período de transição, onde no decorrer dos anos a vazão do Rio São Francisco vai sofrendo reduções contínuas, o que diminui de forma drástica a carga sólida de arrasto, como pode ser observado na Figura 21. A quantidade de material particulado perdido para deriva costeira se torna visível, alterando de forma significativa a composição da linha de costa, como observando nos mapas de 2013, 2014 e 2015 (Figura 21).

Nos anos de redução abrupta da vazão (2016-2018) a morfologia do Delta do São Francisco é alterada completamente, tanto do lado alagoano, como do sergipano, resultando em remoção e perda de uma grande porção de terra. Como a vazão para este período encontra-se um pouco acima de  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  o Rio não possui mais sedimentos suficientes para compensar as perdas para a deriva costeira, e desta forma, a retirada de material supera a carga sólida que alcança o Delta ocasionando a modificação costeira.



Figura 21 – Linhas de Costa 2009-2018



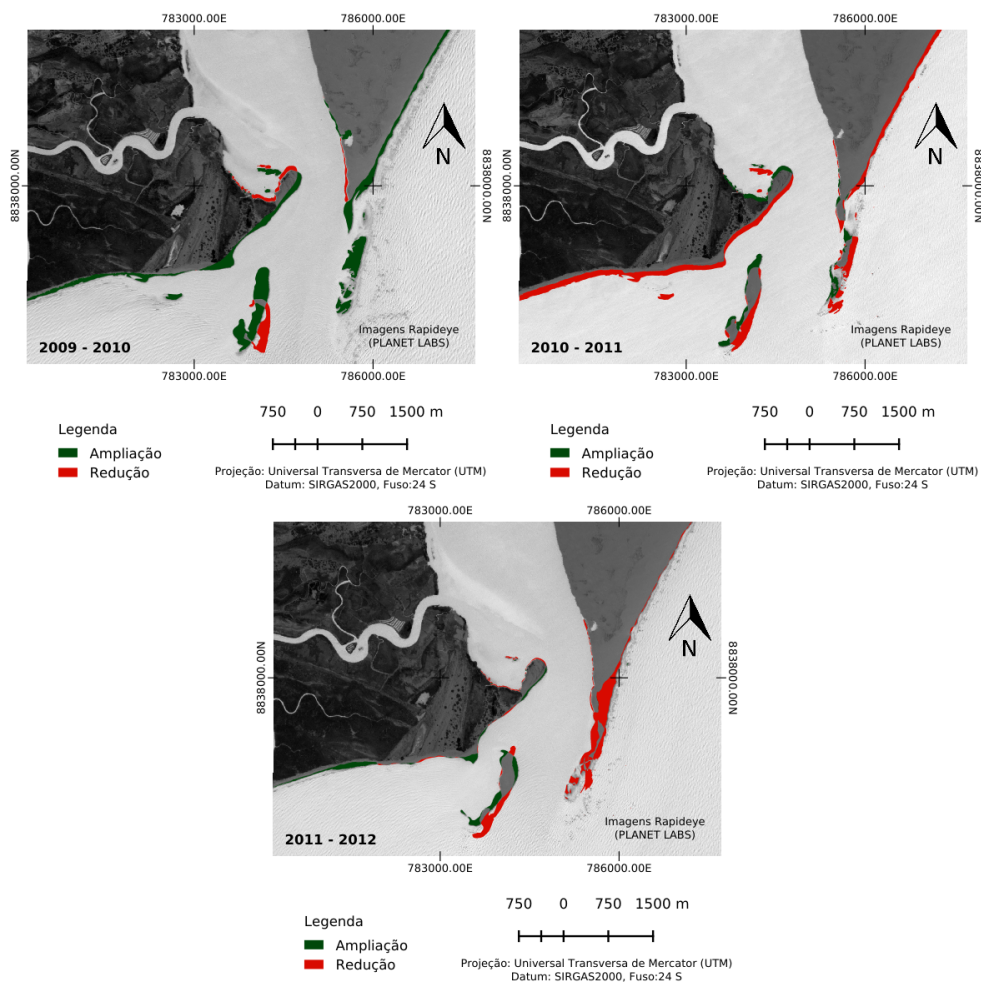
Fonte: elaborado pela autora

### 5.2.2 Análise temporal (2009 a 2018) da morfologia costeira

Analisando a estrutura das linhas de costa durante o período estudado nesta pesquisa, observou-se que houve um equilíbrio na redução e ampliação de sedimentos no Delta do Rio São Francisco entre os anos de 2009 e 2012, período caracterizado pela vazão elevada (acima de  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e uma perda contínua entre os anos de 2015 a 2018 período de vazão baixa.

Na morfodinâmica do Delta no período de 2009 a 2012 existe um balanceamento entre a perda e a recomposição de sedimentos. A relação entre as áreas ampliadas (verde) e reduzidas (vermelho) são bastante similares, onde a perda estimada em um ano é recuperada no ano seguinte. Analisando a Tabela 8 constatasse que o Delta no ano de 2009 para 2010 sofreu uma redução de  $21,54 \text{ ha}$  e uma ampliação de  $113,22 \text{ ha}$  em contrapartida de 2010 para 2011 obteve uma redução de  $102,04 \text{ ha}$  e ampliação de  $23,05 \text{ ha}$  e esta complementação persiste até 2014, a análise qualitativa deste fenômeno pode ser observada através da Figura 22.

Figura 22 – Mapa Diferença (2009-2010), (2010-2011) e (2011-2012)

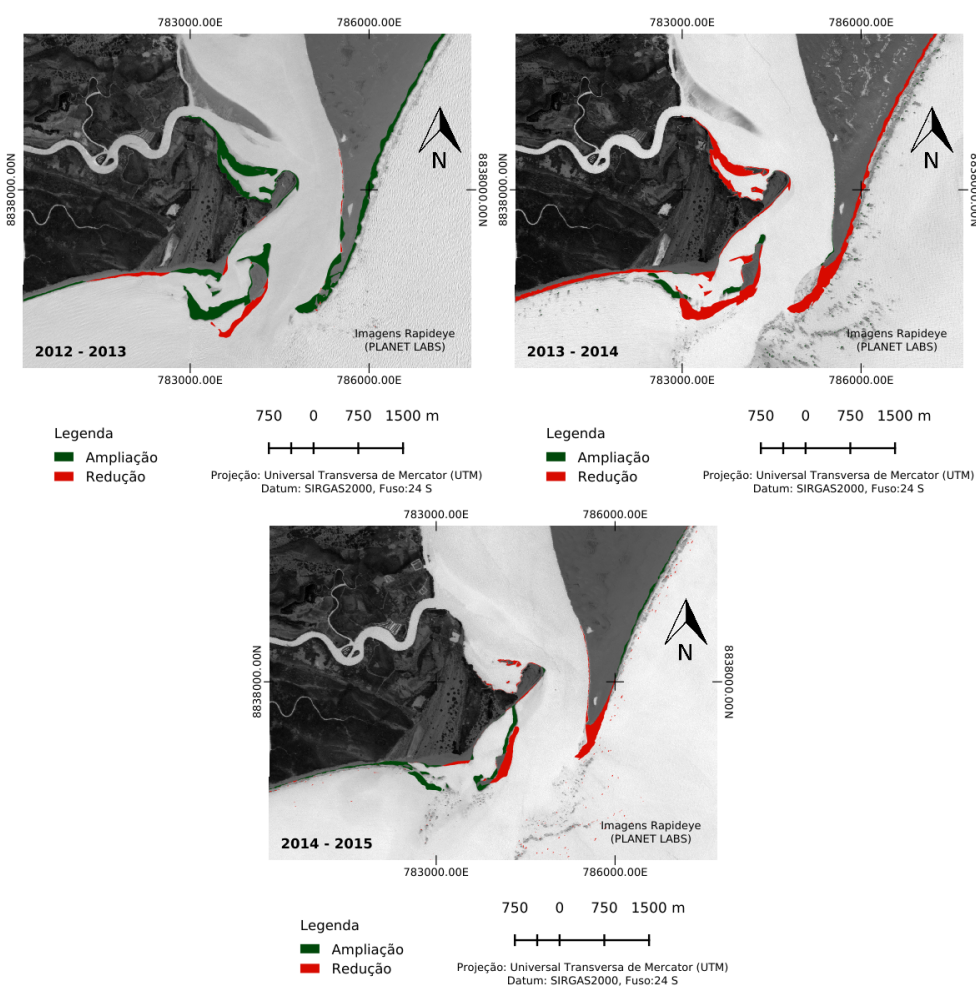


Fonte: elaborado pela autora

Analisando os mapas da Figura 23 é apresentado o período de transição entre as altas e baixas vazões observa-se um intenso processo de transformação do Delta do São Francisco. A partir da redução da vazão, ocorreu redução no potencial de transporte de sedimentos e assim, redução da carga sólida em direção à foz do rio, refletindo na falta de reposição dos sedimentos que foram transportados pela deriva litorânea. Tal redução na reposição dos sedimentos podem ser observados nos mapas de contorno da linha costa, onde um alteração drástica é observado.

Entre o período de 2013 e 2014 houve quase que uma igualdade entre as áreas de ampliação e redução, sendo ampliado 118,13 ha e reduzido 18,59 ha para a diferença entre 2012-2013 e 14,25 ha de ampliação e 117,01 ha de redução para a diferença entre 2013-2014. Em contrapartida para a diferença entre 2014-2015 começa a existir mais redução que ampliação, sendo ampliado 27,03 ha e reduzido 67,68 ha (Tabela 8).

Figura 23 – Mapa Diferença (2012-2013), (2013-2014) e (2014-2015)

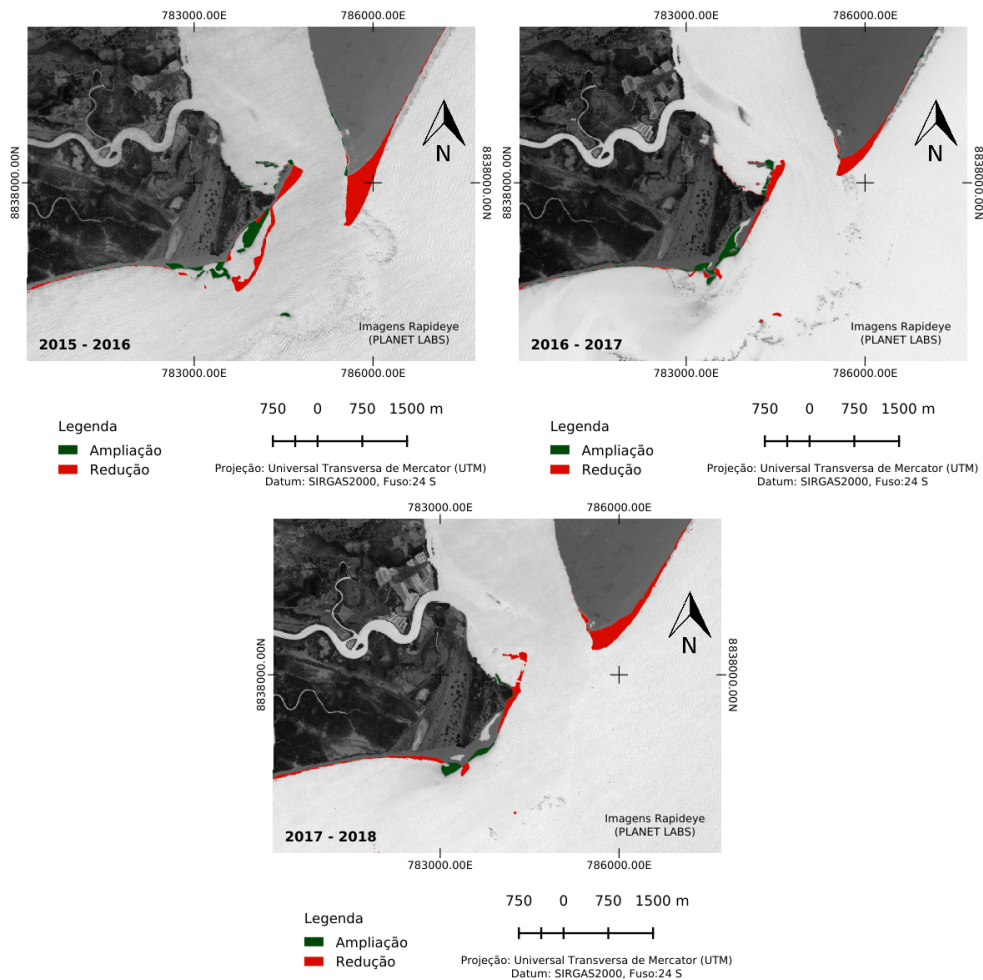


Fonte: elaborado pela autora

De acordo com os mapas das diferenças para o período de baixa vazão (Figura 24) observa-se uma tendência de retração contínua das áreas junto à foz, ao mesmo tempo, o gradiente de ampliação torna-se menor, com baixa taxa de aumento das áreas. Este padrão pode estar associado à redução drástica do aporte de sedimento em direção ao delta, resultado da baixa capacidade do rio em transportar sedimentos, após a redução em 39 % da vazão, comparando com o período de alta vazão (Tabela 8).

Se compararmos todos os valores reduzidos e os ampliados para o período de 2015 a 2018, totalizou-se 53,01 ha de ampliação para 152,45 ha de redução, ou seja, uma perda três vezes maior que o ganho (Tabela 8).

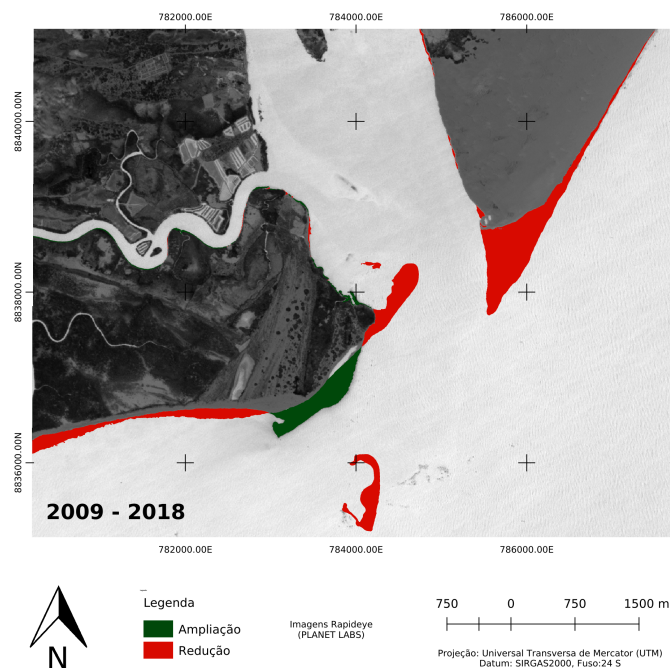
Figura 24 – Mapa Diferença (2015-2016), (2016-2017) e (2017-2018)



Fonte: elaborado pela autora

Na Figura 25 é apresentada a diferença entre o ano de 2009 e 2018, ficando evidente a modificação da morfologia do Delta do Rio São Francisco. A margem esquerda do delta pertencente ao Estado de Alagoas, sofreu uma grande redução, podendo ser explicado devido a alta incidência oblíqua das ondas ao longo da costa alagoana que ao atingir um delta com baixa reposição de sedimento, torna a remoção de sedimentos da margem direita, Estado de Sergipe, provoca uma intensa erosão nesta margem, como visto nos mapas comparativos. De acordo com as estimativas, tem-se entre 2009 e 2018. Este processo resultou em uma redução significativa da área junto à foz, como indicado pelos valores finais, indicando uma ampliação total de 32,53 *ha*, comparado com a intensa erosão de aproximadamente 124,77 *ha*.

Figura 25 – Mapa Diferença entre os anos de 2009 e 2018



Fonte: elaborado pela autora

Tabela 8 – Quantitativo de ampliação e redução por ano de linha de costa

Diferença (Ano base - Ano alvo)	Ampliação (ha)	Redução (ha)	Vazão Anual Média ( $m^3/s$ ) (Ano base)
2009 - 2010	113,22	21,54	2.153,85
2010 - 2011	23,05	102,04	1.870,93
2011 - 2012	21,81	55,92	2.079,16
2012 - 2013	118,13	18,59	2.189,61
2013 - 2014	14,25	117,01	1.397,58
2014 - 2015	27,03	37,14	1.240,42
2015 - 2016	25,49	67,68	1.014,47
2016 - 2017	18,98	32,82	841,13
2017 - 2018	8,54	51,95	679,64

Fonte: elaborado pela autora.

### 5.3 Análises da variação de largura do Delta do Rio São Francisco

Utilizando-se das imagens de NDWI estimadas para extração das linhas de costa, foi analisada a largura do Delta do Rio São Francisco para os dez anos de estudo desta pesquisa (2009 a 2018), foi atribuído um ponto fixo na margem Sergipana do Delta, seguindo o sentido Sudoeste-Nordeste e esta linha foi ampliada ou reduzida para sempre tocar as margens (Figura 26).

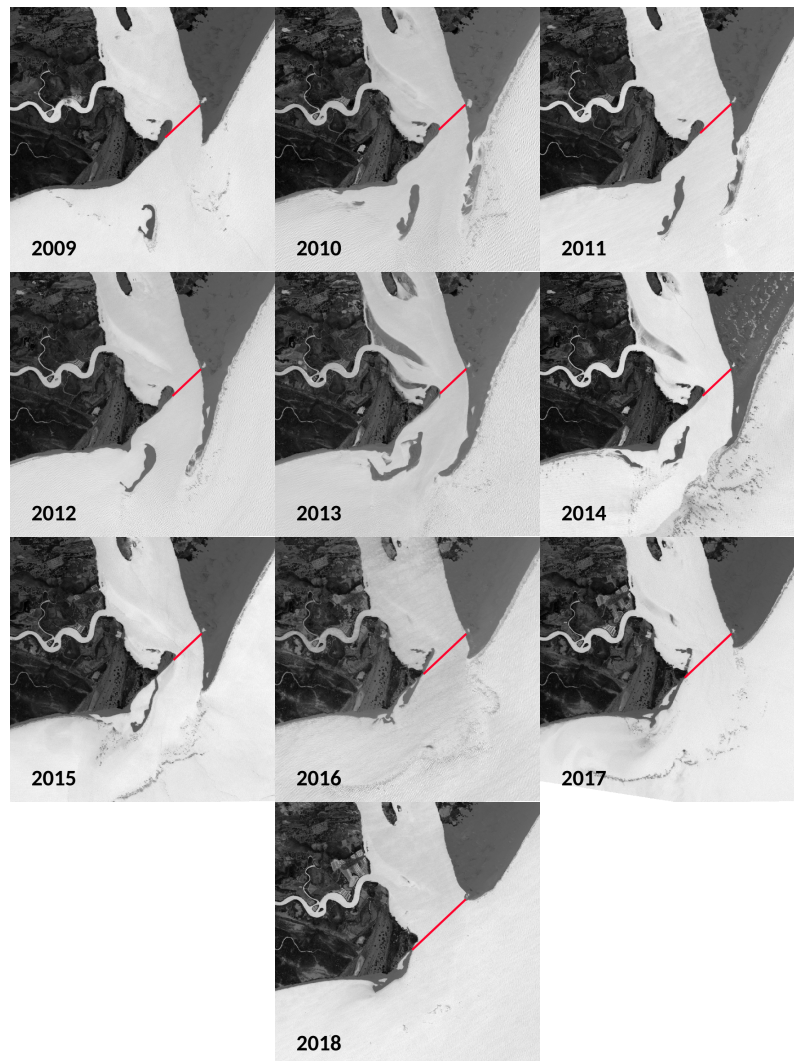
Nos anos de alta vazão (2009 a 2012) a média de largura para o Delta é de 1.040,59 m, no período de transição de 2013 a 2015 as média da largura fica em 948,67 m, tal redução pode ser explica pela desprendimento de sedimentos da parte interna do Delta visto na Figura 23. No período de redução de vazão (2016 a 2018) a média sofre uma aumento para 1.617,68 m (Tabela 9) o que demostra que os sedimento perdidos estão em maior proporção do que os materiais particulados sólidos que alcançam o Delta.

Tabela 9 – Comprimento do delta do São Francisco

Ano	Comprimento (m)
2009	1.200,66
2010	908,48
2011	1.073,22
2012	980,03
2013	900,24
2014	980,50
2015	965,27
2016	1.492,38
2017	1.635,95
2018	1.886,70

Fonte: elaborado pela autora.

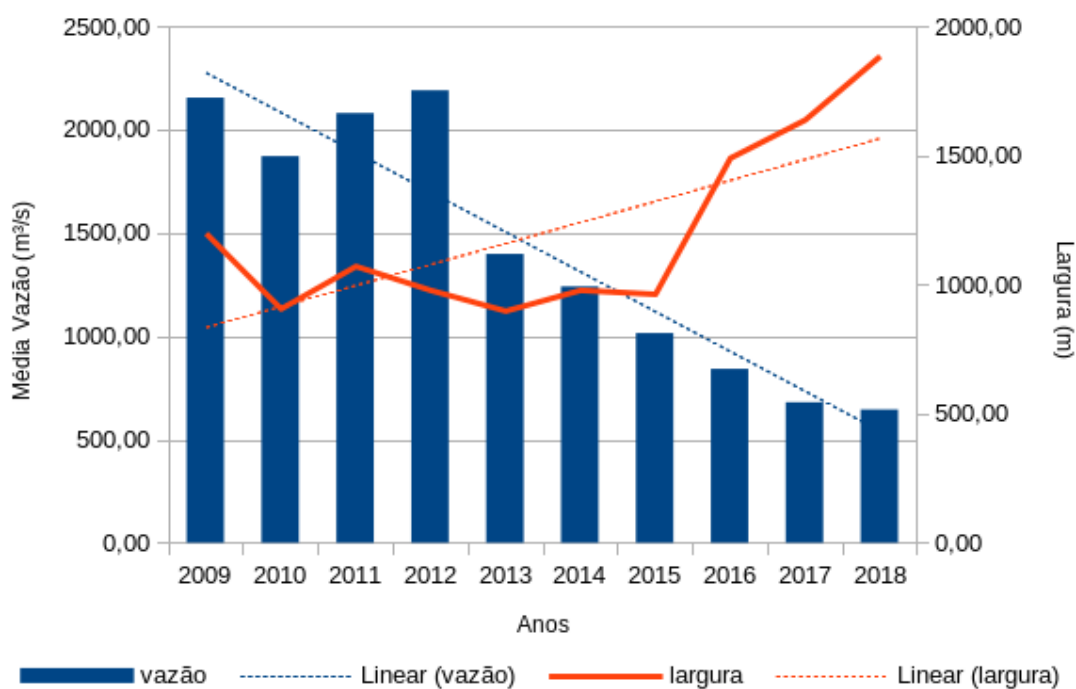
Figura 26 – Local de medida para largura do Delta (sentido Sudoeste-Nordeste)



Fonte: elaborado pela autora

Visando analisar a relação inversamente proporcional entre a vazão e a largura do Delta foi elaborado o gráfico da Figura 27. Neste gráfico é apresentado as vazões calculado para cada ano. As linhas de tendência entre a vazão e a largura da foz indicam um padrão inverso, onde durante a redução da vazão, ocorre um aumento na largura do delta, demonstrando a influencia no padrão de redução no aporte de sedimento causado pela tendência decrescente da vazão.

Figura 27 – Vazão x Largura



Fonte: elaborado pela autora



## 6 CONCLUSÃO

- As vazões sofreram variações abruptas no período de 10 anos deste estudo, possuindo valores acima de  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$  entre os anos de 2009 e 2012, valores abaixo de  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$  e acima de  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$  para os anos de 2013 e 2015 e valores abaixo de  $1.000$  para entre 2016 e 2018, ficando marcado três períodos que impactam diretamente no Delta do Rio São Francisco, alta vazão (2009-2012), período de transição (2013-2015) e baixa vazão (2016-2018).
- As imagens do satélite *RapidEye*, captadas através do sensor REIS, se mostraram muito eficiência para estimativa de NDWI, tanto pela sua resolução espacial (5 metros), quanto pela resolução espectral, permitindo a extração das linhas de costa de forma bastante detalhada.
- As linhas de costa extraídas a partir da imagens estimadas de NDWI, seguiram a tendência de variação conforme os períodos de vazão, no período de 2009 a 2012 as variações foram mínimas, começando as modificação mais severas partir de 2013 e modificando completamente entre 2016 e 2018.
- A variação da morfologia da região do Delta do Rio São Francisco possui um balanceamento entre os sedimentos que chegam no Delta através do leito do Rio e os que são retirados pela deriva litorânea entre os anos de 2009 e 2012, entre 2013 e 2015 houve uma ampliação e redução bastante controlada, em um ano perdia-se materiais sólidos em outro os mesmos eram repostos. Posteriormente a 2015 a perda de sedimentos sempre supera as ampliações, em grande parte pela redução abrupta da vazão.
- Com a análise de todos os pontos abordados, e analisando também a variação interanual da largura do Delta do Rio São Francisco, concluiu-se que existe uma relação inversamente proporcional entre a variação de vazão e a ampliação da largura do Delta, no período de alta vazão, o Delta se mantinha com largura média de  $1.040,59 \text{ m}$ , no período de transição média de  $948,67 \text{ m}$  e no de baixa vazão existe um aumento médio significativo para  $1.617,68 \text{ m}$ .
- Diante de todo o exposto notasse que a variação de morfodinâmica do Delta do Rio São Francisco, vem sofrendo grandes e abruptas modificações, tendo um dos principais motivos a regulação da vazão do Rio, acarretando a redução do transporte de sedimentos, o que acaba ampliando de forma significativa a ação da deriva litorânea. Estes fatores vem contribuindo com a ampliação da largura do Delta, o que modifica a linha de costa e trás impactos ambientais a região.

## 6.1 Recomendações

Como recomendações para trabalhos futuros seriam interessantes estudos mais aprofundados voltados a análise dos impactos ambientais que a variação morfológica do Delta do Rio São Francisco pode gerar. Tanto relacionados a impactos no meio natural como no meio antrópico.

Outro ponto interessante seria a prospecção de como o cenário poderia ficar caso houvesse outras variações de vazão, assim, poderia ser pensado cenários estratégicos que atendessem a contenção por conta da seca, porém, que impactasse mesmo o curso d'água.

Por fim, espera-se que o conteúdo desta pesquisa contribua para o crescimento científico da gestão de recursos hídricos através da integração com o sensoriamento remoto e os softwares livres.

# REFERÊNCIAS

- ALVES, C. B. M.; POMPEU, P. dos S.; HORIZONTE, B. *Peixes do Rio das Velhas: passado e presente*. [S.l.]: Argumentvm, 2010.
- AMSKEPLER. *RapidEye Info*. 2019. Disponível em: <<http://www.amskepler.com/rapideye-info/>>. Acesso em: 29 mar 2019.
- ANA. *Hidrologia Básica*. 2012. Disponível em: <<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/66>>. Acesso em: 28 abr 2019.
- ANA. *HidroWeb: sistemas de informações hidrológicas*. 2019. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 05 maio 2019.
- ANA. *Sobre a ANA*. 2019. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/aceso-a-informacao/institucional/sobre-a-ana>>. Acesso em: 10 jun 2019.
- ANA. *São Francisco*. 2019. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sala-de-situacao/sao-francisco/sao-francisco-saiba-mais>>. Acesso em: 28 abr 2019.
- ANTUNES, M. A. H.; DEBIASI, P.; SIQUEIRA, J. C. dos S. Avaliação espectral e geométrica das imagens rapideye e seu potencial para o mapeamento e monitoramento agrícola e ambiental. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 1, n. 66/1, 2014.
- AVANZI, J. C.; BORGES, L. A. C.; CARVALHO, R. Proteção legal do solo e dos recursos hídricos no Brasil. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 2, n. 2, p. 279–292, 2009.
- AVERY, T. E.; BERLIN, G. L. *Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation*. Prentice Hall., 1992.
- BIRD, E. C. *Coastal geomorphology: an introduction*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- BLACKBRIDGE. *Satellite Imagery Product Specifications*. 2015. Disponível em: <<http://blackbridge.com/>>. Acesso em: 28 abr 2019.
- BRAGA, B. *Introdução à engenharia ambiental*. [S.l.]: 2 ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2005.
- BRASIL. *Decreto Federal no 23.793, de 10 de julho de 1934. Decreta o Código das Águas*. [S.l.]: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 1934.
- BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil*. [S.l.]: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.
- BRASIL. *LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997*. [S.l.]: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 1997.
- BRASIL. *LEI Nº 9.984, DE 17 DE JULHO DE 2000*. [S.l.]: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2000.

BUSS, D. F.; BAPTISTA, D. F.; NESSIMIAN, J. L. Bases conceituais para a aplicação de biomonitoramento em programas de avaliação da qualidade da água de rios. *Cadernos de Saúde Pública*, SciELO Public Health, v. 19, p. 465–473, 2003.

CABRAL, V. *Pombos de Guerra*. 2015. Disponível em: <<http://www.historiazine.com/2012/08/pombos-de-guerra.html>>. Acesso em: 29 jan 2015.

CAVALCANTE, A. *Impactos nos Processos Morfológicos do Baixo Curso do Rio São Francisco, Decorrentes da Construção de Barragens, 162 f.* Tese (Doutorado) — UFRJ. Rio de Janeiro, 2011.

CAVALCANTE, L. B. *Implementação do Algoritmo SEBAL em Linguagem LEGAL/Spring. Aplicação para o Complexo Irrigado de Petrolina-PE/Juazeiro-BA.* [S.l.]: Universidade Federal de Alagoas, 2015.

CEDRAZ, M. et al. Gerenciamento dos recursos hídricos-um tema em discussão. In: SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 25.* [S.l.], 2000. p. 111–126.

CHESF. *Sistemas de Geração*. 2019. Disponível em: <<https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/SistemasGeracao.aspx>>. Acesso em: 20 abr 2019.

COELHO, A. L. N. Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens-fluvial geomorphology of rivers impacted from dams. *Caminhos de Geografia*, v. 9, n. 26, 2008.

DESTEFANI, E. *Regimente Hidrológico do Rio Ivaí - PR.* Tese (Doutorado), 2005.

DOLAN, R. et al. The reliability of shoreline change measured from aerial photographs. *Shore & Beach*, v. 48, p. 22–29, 1980.

EDUARDO, B. F. S.; SILVA, A. Avaliação da influência da correção atmosférica no cálculo do índice de vegetação ndvi em imagens landsat 5 e rapideye. *16 SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, INPE São José dos Campos, 2013.

ENGESAT. *PLEIADES 1A E 1B*. 2015. Disponível em: <<http://www.engesat.com.br/satelites/pleiades-1a-e-1b/>>. Acesso em: 01 fev 2015.

ESTEVEVES, F. d. A. et al. *Fundamentos de limnologia.* [S.l.], 2011.

ESTEVEVES, S. Estado-da-arte dos métodos de mapeamento da linha de costa. *Exame de Qualificação. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil*, 2003.

FIGUEIREDO, D. *Conceitos básicos de sensoriamento remoto.* [S.l.]: Disponível, 2010.

FLORENZANO, T. G. *Imagens de satélite para estudos ambientais.* [S.l.]: Oficina de textos, 2002.

FONTES, L. *Erosão marginal associada a impactos ambientais a jusante de grandes barragens: O caso do baixo curso do rio São Francisco.* 2002.

GLOBALGEO. *WorldView- 2 - Especificações técnicas básicas.* 2015. Disponível em: <<http://www.globalgeo.com.br/satelite/worldview-2/>>. Acesso em: 01 fev 2015.

- GODINHO, A. L.; GODINHO, H. P. Breve visão do São Francisco. *Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais. Belo Horizonte: PUC Minas*, v. 468, p. 15–23, 2003.
- GUERRA, A. J. T. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. [S.l.]: Bertrand Brasil, 2009.
- INPE. *A criação da DPI... como tudo começou*. 2015. Disponível em: <<http://www.inpe.br/>>. Acesso em: 28 jan 2015.
- LEME, T. N. Os municípios e a política nacional do meio ambiente. *Planejamento e políticas públicas*, v. 2, n. 35, 2010.
- MABESOONE, J. M. *Sedimentologia, 2ª edição*. [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco Editora Universitária, Recife – PE, 1983.
- MAXWELL, J. C. *A treatise on electricity and magnetism*. [S.l.]: Clarendon press, 1881. v. 1.
- MCFEETERS, S. K. The use of the normalized difference water index (ndwi) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, Taylor & Francis, v. 17, n. 7, p. 1425–1432, 1996.
- MEDEIROS, P. R. P.; SEGUNDO, G. H. C.; MAGALHAES, E. M. M. Comportamento da turbidez e material em suspensão, em um rio com vazão regularizada por sistema de barragens em cascata: Rio São Francisco (NE, Brasil). *Geochimica Brasiliensis*, v. 29, n. 1, p. 35–44, 2015.
- MELO, D. Uso de dados Ikonos II na análise urbana: testes operacionais na zona leste de São Paulo. *São José dos Campos*, 2002.
- MENESES, P. R. et al. *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. [S.l.]: Universidade Federal de Brasília, 2012. 276 p.
- MOREIRA, R. da C. Estudo espectral de alvos urbanos com imagens do sensor HSS (hyperspectral scanner system). 2010.
- NOERNBERG, M. A. Processos morfodinâmicos no complexo estuarino de Paranaguá-Paraná-Brasil: um estudo a partir de dados in situ e Landsat-TM. 2001.
- NOVO, E. M. L. d. M. *Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações*. [S.l.]: Blucher, 2010.
- OLIVEIRA, L. S.; MELO, R. Morfodinâmica estuarina e variações do delta de maré-vazante no rio Vaza-Barris, SE, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 16, n. 4, 2015.
- PAIVA, M. P. Grandes represas do Brasil. In: *Grandes represas do Brasil*. [S.l.]: Editerra, 1982.
- PENA, R. *Hidrelétricas no Brasil*. 2019. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/hidreletricas-no-brasil.htm>>. Acesso em: 12 abr 2019.
- PERILLO, G.; ANGELES, G.; PICCOLO, M. Argentina coast vulnerability assessment built around GIS. *ESRI News (fall)*, 1999.

- PINHEIRO, L. de S.; MORAIS, J. O. de. Interferências de barramentos no regime hidrológico do estuário do rio catú -ceará -nordeste do brasil. *Revista Sociedade & Natureza*, SciELO Brasil, v. 22, n. 2, 2010.
- PLANET. *Planet Platform Documentation*. 2019. Disponível em: <<https://www.planet.com/docs/>>. Acesso em: 29 mar 2019.
- QGIS, D. T. *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*. 2019. Disponível em: <<http://www.qgis.org/>>. Acesso em: 19 abr 2019.
- RIBEIRO, B. M. G.; FONSECA, L. M. G.; KUX, H. J. H. Mapeamento da cobertura do solo urbano utilizando imagens worldview-ii e o sistema interimage. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 63, 2011.
- ROSATI, J. D. Concepts in sediment budgets. *Journal of Coastal Research*, p. 307–322, 2005.
- SCHOWENGERDT, R. A. *Techniques for image processing and classification in remote sensing*. [S.l.]: Academic Press, 1983.
- SILVA, A. M. D. *Erosão e hidrossedimentologia em bacia hidrográficas*. [S.l.]: Rima, 2003.
- SUGUIO, K. *Introdução à sedimentologia*. [S.l.], 1973.
- SUGUIO, K. *Dicionário de geologia marinha: com termos correspondentes em inglês, francês e espanhol*. [S.l.]: TA Queiroz, Editor, 1992.
- TEIXEIRA, G. A. J.; CUNHA, S. B. d. *Geomorfologia uma Atualização de Bases e Conceitos*. [S.l.]: Bertrand Brasil, 2008.
- USGS. *Frequently Asked Questions about the Landsat Missions*. 2015. Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/band\\_designations\\_landsat\\_satellites.php](http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php)>. Acesso em: 31 jan 2015.
- USGS. *Landsat Missions*. 2015. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/>>. Acesso em: 09 fev 2015.
- WELCOMME, R. L. *River fisheries*. [S.l.]: FAO, 1985.
- WRIGHT, L. D. *Morphodynamics of inner continental shelves*. CRC press, 1995.