UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS E DA INFORMAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Monitoramento das áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo com uma série de imagens ERS-1/2 SAR e Envisat ASAR adquiridas entre 1992 e 2007

Raquel Freitas Duarte

Orientador:

Dr. Jorge Arigony Neto

Banca Examinadora:

Dr. Cláudio Wilson Mendes Júnior

Dr. Glauber Acunha Gonçalves

Dr. Waterloo Pereira Filho

Rio Grande
2013

Raquel Freitas Duarte

Monitoramento das áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo com uma série de imagens ERS-1/2 SAR e Envisat ASAR adquiridas entre 1992 e 2007

Dissertação de Mestrado apresentada, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da universidade Federal do Rio Grande.

Orientador:

Dr. Jorge Arigony Neto.

Dedico esta dissertação ao Carlos Neto, pelo amor e companheirismo, e aos meus pais, Sandra e Jorge Duarte, pois eles são a base que proporciona as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, ao meu orientador Dr. Jorge Arigony Neto, pelos ensinamentos, orientações e principalmente por não deixar que a distância fizesse alguma diferença na orientação. Obrigada por acreditar no trabalho, pela paciência em responder meus questionamentos e pela atenção!

Não posso deixar de agradecer também o Dr. Cláudio Wilson Mendes Júnior, que me orientou em diversas questões no decorrer do trabalho, sempre se mostrando disposto a ajudar, e ajudou muito!

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO), pela formação e estrutura; À Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (CAPES) por ter concedido a bolsa de estudo; ao Laboratório de Monitoramento da Criosfera (Lacrio) pelo suporte; ao projeto *A combined approach based on remote sensing and numerical modeling techniques to assess wave energy potential (ESA Category 1 proposal Nr. 6537)*, aprovado pela Agência Espacial Européia por disponibilizar as imagens utilizadas neste trabalho.

Aos meus pais Jorge e Sandra e a minha irmã Cinthia, pela base e pelo apoio, que mesmo à distância continuaram presentes, sempre interessados e me apoiando nos momentos mais difíceis. Tenho que agradecer especialmente à minha mãe por ter se deslocado mais de 1000 km pra me dar um apoio na reta final do trabalho!

Ao Carlos, os agradecimentos vão além. Obrigada por me apoiar em diversas decisões, por pensar positivo enquanto eu pensava ao contrário. E especialmente Obrigada por me "aturar" nesses últimos meses.

A todos os meus amigos que estiveram comigo de alguma maneira nesta jornada. Em especial ao Cristiano Quaresma, pelo apoio virtual diário, me escutando e dizendo palavras positivas. À minha xará Raquel Dumith, pelas conversas, preocupação e incentivo em todo o mestrado. Ao Deivid Alves, pelo coleguismo durante as disciplinas do mestrado e também na dissertação, sempre procurando ajudar com bibliografias e qualquer assunto relacionado à pesquisa e principalmente por ter proporcionado ótimas ideias ao trabalho. Ao Allan de Oliveira, Luciano Lucas e à Rossana Madruga, aos quais eu recorri diversas vezes e que serão sempre meus amigos e professores.

À minha amiga de infância, Marina Reguffe, que depois de muitos anos de pouca convivência veio a contribuir na finalização deste trabalho, mostrando que a nossa amizade continua a mesma!

Aos colegas do LACRIO, pelo tempo, mesmo que pouco, de convívio e também pela força mesmo à distância. Muitas vezes precisei da ajuda dos colegas por e-mail e eles sempre se mostraram dispostos a ajudar.

Aos colegas de trabalho que procuraram me ajudar emprestando livros, proporcionando ideias e apoio principalmente na reta final.

Aos membros da banca por aceitarem o convite.

A todos que de uma maneira ou outra participaram desta jornada!

RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo monitorar a variação na extensão das áreas úmidas e das áreas inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo, em uma série temporal de imagens ERS-1 e 2 SAR e ENVISAT ASAR adquiridas entre 1992 e 2007. Para isso, foram criados dois algoritmos, baseados em limiares de retroespalhamento e produtos de razão de imagens, capazes de classificar as áreas úmidas e inundas. Além disso, foram realizadas análises espaciais, a fim de observar as áreas onde ocorrem com mais frequência áreas úmidas e/ou inundadas. Dados meteorológicos também foram utilizados com o intuito de estabelecer uma análise comparativa entre áreas úmidas e inundadas e a precipitação, os fenômenos El Niño e La Niña, a velocidade e a direção do vento. Os resultados demonstraram que as maiores extensões de áreas úmidas ocorrem com mais frequência nos primeiros meses do ano (*i.e.*, entre janeiro e maio), enquanto as áreas inundadas são mais frequentes nos meses de inverno (*i.e.*, entre junho e agosto), merecendo destaque o mês de agosto, que representa a maior extensão de áreas inundadas, 28.632,3 ha na imagem adquirida em 26/08/2002. Porém a maior extensão de áreas úmidas não está nos primeiros meses do ano, como é mais comum, e sim na imagem de 25/09/2000 que apresentou 63.742,2 ha. As áreas úmidas apresentam-se bastante distribuídas na área de estudo, e demonstram maior frequência nas áreas adjacentes aos principais cursos d'água. Já as áreas inundadas apresentam-se concentradas em certas porções da área de estudo, principalmente nas proximidades da foz do Rio Piratini, que localiza-se na margem noroeste do canal, bem como na margem sudeste na mesma direção. Os fatores meteorológicos analisados apresentaram relação visual tanto com as áreas úmidas quanto com as inundadas. Foi possível definir que ambas as áreas ocorrem com mais frequência, na série temporal analisada, em anos de ocorrência do fenômeno La Niña. Porém a maior extensão de área inundada ocorreu na presença do fenômeno El Niño. Ainda foi possível definir que as maiores extensões de áreas úmidas ocorrem com precipitação acumulada bem distribuída nos 30 dias que antecedem as imagens, direção do vento predominante leste com velocidade média entre 4 e 7 m/s. Já as maiores extensões de áreas inundadas ocorrem, na maior parte, com chuvas constantes e mais concentradas nos 30 dias que antecedem a análise, direção de vento nordeste com velocidade média entre 1,7 e 4 m/s.

ABSTRACT

This master's thesis has as main objective to monitor the variation in the extent of wetlands and flooded areas surrounding the São Gonçalo Channel, in a time series of ERS-1 and 2 SAR and ENVISAT ASAR imagery acquired between 1992 and 2007. In order to accomplish this task, two algorithms were created to classify wetlands and flooded areas based on thresholds in backscattering and ratio product images. Furthermore, spatial analyzes were performed in order to identify the areas that are most frequently wet and/or flooded. Meteorological data were also used in order to establish a comparative analysis of wetlands and flooded areas with rainfall, the El Niño and La Niña phenomena, and wind speed and direction. The results showed that the largest expanses of wetlands occur more frequently in the first months of the year (ie, between January and May). On the other hand, the largest extensions of flooded areas are more frequent in the winter months (ie, between June and August), especially in August. During this Month, it was recorded the largest expanse of flooded areas, 28,632.3 ha in 2002. The largest extension of wetlands, 63,742.2 ha, was registered with the image acquired on 09/25/2000. Wetlands occur along the whole study area, but more frequently in areas close to the channel. The flooded areas are concentrated in some regions of the study area, especially near the mouth of the Piratini River. Both areas occur more frequently in years of La Niña. Nevertheless, the greatest expanse of the flooded area occurred during a year of El Niño. The largest extensions of wetlands occur in conditions of high precipitation, well distributed during periods of 30 days preceding image acquisitions, wind direction predominantly east with an average speed between 4 and 7 m/s. The largest expanses of flooded areas occurred with high precipitation during the month before image acquisitions, but wind direction northeast, with average speeds between 1.7 and 4 m/s.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização da área de estudo. Imagem ERS-2 SAR adquirida em 25 de setembro de 2000. A linha em azul indica o Canal São Gonçalo, e o polígono em volta é o limite máximo aproximado da área de inundação do canal, que foi definida como a área de classificação das imagens. 19
Figura 1.2: Paisagem no entorno do Canal São Gonçalo. 20
Figura 2.1: Vegetação predominante nas margens do Canal São Gonçalo. Observe que a vegetação é de plantas herbáceas, com predomínio de juncáceas com folhas lineares. ... 24
Figura 2.2: Áreas de plantio nas proximidades do Canal São Gonçalo. Imagem ENVISAT ASAR adquirida em 26/02/2007. 27
Figura 2.3: Áreas de pastagem ao longo do Canal São Gonçalo. À esquerda a imagem ENVISAT ASAR adquirida em 04/09/2006 abaixo, e acima detalhe das áreas onde localizam-se as pastagens. À direita estão as imagens das pastagens que estão representadas na imagem ENVISAT. 28
Figura 2.4: Usos múltiplos no entorno do Canal São Gonçalo. Foto feita de cima da antiga ponte que liga o município do Rio Grande ao município de Pelotas. 28
Figura 2.5: Características geométricas do imageamento adquirido por um SLAR. 33
Figura 2.6: Imagem em alcance inclinado e imagem em alcance no terreno. 34
Figura 2.7: Variação da resolução espacial do radar de abertura real (a) e do radar de abertura sintética (b). 35
Figura 2.8: Diferença da resolução em azimute no alcance próximo e no alcance distante. ... 36
Figura 2.9: Diferentes alvos passiveis de identificação em imagens SAR. Imagem ERS-2 adquirida em 21/08/2000. 40
Figura 3.1: O ponto vermelho indica a localização da estação meteorológica de Pelotas, e a área amarela indica a área de estudo. 48
Figura 3.2: Etapas realizadas para classificação das imagens, indicando qual o software utilizado. 49
Figura 3.3: Fórmula utilizada no modelo polinomial. 52
Figura 3.4: Imagens A, B, C , D e E – L foram adquiridas pelos sensores ERS-1 e ERS-2 SAR, respectivamente. Ao analisar as imagens é possível perceber diferenças nos tons de cinza, causadas pelas diferenças no retroespalhamento. Este fato se deve as diferentes

datas de aquisição das imagens, já que a dinâmica do canal, bem como das áreas adjacentes, modifica no decorrer do ano. 53
Figura 3.5: Imagens M – N e O – S foram adquiridas pelos sensores ERS-2 SAR e ENVISAT ASAR, respectivamente. Ao analisar as imagens é possível perceber diferenças nos tons de cinza, causadas pelas diferenças no retroespalhamento. Este fato se deve as diferentes datas de aquisição das imagens, já que a dinâmica do canal, bem como das áreas adjacentes, modifica no decorrer do ano. 54
Figura 3.6: Em vermelho as áreas correspondentes aos valores de retroespalhamento selecionados para o limiar de -12,6 e -7,4 dB. 56
Figura 3.7: Resultado da razão entre as imagens de 25/09/2000 e 04/10/2004. As tonalidades mais claras representam os menores valores, ou seja, as áreas úmidas, enquanto as mais escuras correspondem aos valores mais altos. 58
Figura 3.8: Máscara utilizada para delimitar as áreas a serem classificadas. O valor em hectares indica a área total da máscara. 59
Figura 3.9: Representação do algoritmo usado para classificar as áreas úmidas. O exemplo mostra a classificação da imagem obtida em 05/06/1992 (C), com as três condições utilizadas, bem como a imagem classificada. 60
Figura 3.10: Resultado da razão entre as imagens de 26/08/2002 e 04/10/2004. As tonalidades mais claras representam os menores valores, ou seja, as áreas inundadas, enquanto as mais escuras correspondem aos valores mais altos de retroespalhamento. 62
Figura 3.11: Representação do algoritmo usado para classificar as áreas inundadas. O exemplo mostra a classificação da imagem obtida em 21/08/2000 (C), com as três condições utilizadas, bem como a imagem classificada. 62
Figura 4.1: Variação na extensão das áreas úmidas do Canal São Gonçalo durante o período 1992-2007. 65
Figura 4.2: Variação espacial das áreas inundadas na planície do Canal São Gonçalo. As estimativas resultantes das demais imagens da série temporal não foram representadas devido à pouca representatividade espacial. 66
Figura 4.3: Somatório do quantitativo de áreas úmidas e inundadas por mês. 67
Figura 4.4: Variação espacial das áreas inundadas na planície do Canal São Gonçalo. As estimativas resultantes das demais imagens da série temporal não foram representadas devido à pouca representatividade espacial. 70
Figura 4.5: Frequência das áreas inundadas ao longo da série temporal. 71
Figura 4.6: Frequência da ocorrência das áreas úmidas no período quente 72

Figura 4.7: Frequência das áreas úmidas no período frio 72
Figura 4.8: Frequência da ocorrência das áreas inundadas no período frio 73
Figura 4.9: Frequência da ocorrência das áreas inundadas no período quente..... 73
Figura 4.10: Ocorrência mais frequente de áreas úmidas ou inundadas ao longo da série temporal. 74
Figura 4.11: Relação entre a extensão das áreas úmidas e inundadas, e a precipitação acumulada nos 30, 15 e 7 dias que antecederam as aquisições das imagens. 76
Figura 4.12: Evolução das áreas úmidas de acordo com os fenômenos El Niño e La Niña. ... 79
Figura 4.13: Evolução das áreas inundadas de acordo com os fenômenos El Niño e La Niña. 79
Figura 4.14: Áreas úmidas e inundadas, precipitação acumulada nos 30, 15 e 7 dias que antecedem a data de aquisição das imagens e ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña. 80
Figura 4.15: Análise da extensão das áreas úmidas e direção predominante do vento. 81
Figura 4.16: Análise das áreas inundadas e direção predominante do vento. 82
Figura 4.17: Influência da velocidade média do vento na extensão de áreas úmidas e inundadas. 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comprimentos de onda e frequências de radar usados em sensoriamento remoto por micro-ondas ativas.....31
Tabela 2.2: Metodologias de classificação de áreas alagáveis em diversos locais do planeta, citando o autor, o sensor utilizado, as classes adotadas e a precisão do método.....38
Tabela 3.1: Principais características dos sensores ERS-1 SAR, ERS-2 SAR e Envisat ASAR. 45
Tabela 3.2: Data de aquisição das imagens e satélite. 46
Tabela 4.1: Áreas úmidas e inundadas classificadas em cada uma das imagens. 68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIRSAR – Ariborne Synthetic Aperture Radar

ALM - Agência da Lagoa Mirim

AMI - *Active Microwave Instrument*

ASAR - *Advanced Synthetic Aperture Radar*

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

BDMEP - Banco de Dados para Ensino e Pesquisa

CCM - Complexos Convectivos de Mesoescala

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

ENVISAT – *Environmental Satellite*

ERS - *European Remote Sensing Satellite*

ESA – *European space agency*

FAO/SAFR - F*ood and Agriculture Organization of the United Nations/ Subregional Office for Southern and East Africa*

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler

FURG – Universidade Federal do Rio Grande

FTP – *File Transfer Protocol*

GDEM – *Global Digital Elevation Model*

Grd - *Ground-range*

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

JERS - *Japanese Earth Resources Satellite*

METI - *Ministry of Economy, Trade and Industry*

NASA - *United States National Aeronautics and Space Administration*

NEST - *Next ESA SAR Toolbox*

RADAR – *Radio Detection and Ranging*

RADARSAT – *RADAR Satellite*

RGB – *Red, Green and Blue*

RMS - *Root Mean Square*

SAR - *Synthetic Aperture Radar*

SEMA - Secretaria do Meio Ambiente

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

SLAR - *side-looking airborne radar*

SML - *Spatial Modeler Language*

Srd - S*lant-range*

TM - *Thematic Mapper*

USFWS - *U.S. Fish and Wildlife Service*

USGS - *United States Geological Survey*

UTC - *Coordinated Universal Time*

WGS84 - *World Geodetic System* 1984

SUMÁRIO

1. Introdução 16
1.1. Justificativa 17
1.2. Objetivos 18
1.3. Área de estudo 18
2. Referencial Teórico 22
2.1. Áreas úmidas 22
2.1.1. Definição e importância das áreas úmidas 22
2.1.2. Áreas úmidas e a área de estudo 23
2.1.3. Áreas úmidas: inventário e caracterização 25
2.1.4. Áreas úmidas e problemáticas ambientais 26
2.1.5. Áreas úmidas e legislação ambiental 29
2.2. Radar de abertura sintética 30
2.2.1. Características e componentes do radar 30
2.2.2. Características geométricas do imageamento por radar 32
2.2.3. Imagens de radar e o mapeamento de áreas úmidas 37
2.2.4. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto 40
2.2.5. Pré-processamento 41
2.2.6. Classificação de Imagens 43
3. Material e Métodos 44
3.1. Dados e Aquisição 44
3.1.1. Dados ERS-1 e 2 SAR e Envisat ASAR. 45
3.1.2. Dados Landsat TM 46
3.1.3. Modelo Digital de Elevação ASTER GDEM 47
3.1.4. Dados Meteorológicos 47
3.2. Softwares 49

3.3. Processamento das imagens SAR 50

3.3.1. Pré-processamento 50

3.3.2. Criação do modelo e classificação das imagens 55

3.4. Análise da frequência da ocorrência das áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo 63

4. Resultados e Discussão 64

4.1. Variação na extensão das Áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo 64

4.2. Análise espacial da ocorrência de áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo 69

4.2.1. Análise da frequência da ocorrência de áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo 69

4.2.2. Análise sazonal da ocorrência de áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo 71

4.2.3. Análise da frequência de ocorrência de áreas úmidas ou inundadas nas áreas adjacentes ao Canal São Gonçalo 73

4.3. Extensão das áreas úmidas e inundadas e fatores ambientais 75

4.3.1. Precipitação 75

4.3.2. Fenômenos El Niño e La Niña 78

4.3.3. Direção e velocidade dos ventos 81

4.3.4. Análise da influência de parâmetros ambientais nas variações das áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo 82

5. Conclusões 85

6. Referências Bibliográficas 87

1. INTRODUÇÃO

As áreas úmidas fornecem diversos benefícios ecológicos, econômicos e sociais. Essas áreas ou zonas são de grande importância para as características da paisagem, pois mantém e liberam lentamente a água de inundações e derretimento de neve, recarregam águas subterrâneas, reciclam nutrientes e ainda proporcionam recreação e observação da vida selvagem para a população. Além dessas zonas serem cruciais para o balanço hidrológico, elas também servem como indicadores da qualidade do ambiente (*U.S. Fish and Wildlife Service - USFWS*, 2012).

Essas áreas são definidas, de acordo com a Convenção de Ramsar, como áreas de pântano, charco ou turfa, água natural ou artificial, permanente ou temporária, com água parada ou corrente, doce, salobra ou salgada, incluindo águas marinhas em que a profundidade em maré baixa não exceda 6 metros (FAO SAFR, 1998). Segundo *Millenium Ecosystem Assessment* (2005), esta ampla definição inclui zonas úmidas interiores (*i.e.*, pântanos, lagos, rios, turfeiras, florestas, cársticos e cavernas), zonas úmidas costeiras e próximas da costa marinha (*i.e.*, mangues, estuários e recifes de coral) e feitas pelo homem (*i.e.*, arrozais, reservatórios e tanques de peixes).

Porém, ao longo dos anos a sociedade ofereceu pouca atenção à conservação e preservação dessas áreas. Devido à sua grande importância na qualidade ambiental, é de grande valia um inventário das zonas úmidas do planeta, para que assim possa-se localizar, quantificar e analisar as características dessas áreas, com o objetivo de preservar e entender os sistemas que atuam sobre elas. Junk *et al*. (2013) apontam a necessidade de maior regulação dessas áreas, devido a estimativa de que 20% do território brasileiro é coberto por áreas úmidas, que encontram-se cada vez mais ameaçadas devido ao aumento da atividade humana.

Uma importante ferramenta para inventário dessas áreas são as imagens de sensoriamento remoto, as quais permitem o mapeamento da extensão e dinâmica de inundações desses locais. Dentre as imagens que podem ser utilizadas nesses estudos, podemos destacar as imagens obtidas por radares de abertura sintética (SAR, sigla em inglês), que operam no espectro na faixa das micro-ondas, são capazes de penetrar as nuvens e operar em quase quaisquer condições meteorológicas.

Além disso, as imagens de radar atuam em comprimentos de onda fora das regiões do espectro eletromagnético visível e infravermelho, sendo capazes de fornecer informações

sobre rugosidade superficial, propriedades dielétricas e conteúdo de umidade da superfície. Outra vantagem desse tipo de dado é a aquisição das imagens em horários especificados pelo próprio usuário, inclusive à noite, e o fato de que o sensor baseia-se na própria energia, podendo controlar o ângulo de iluminação (Jensen, 2011).

1.1. Justificativa

As áreas úmidas são ecossistemas de grande importância ambiental devido à biodiversidade que aportam e aos benefícios ecológicos e sociais que proporcionam. Essas áreas estão, mundialmente, dentre os ecossistemas mais afetados e ameaçados pelo homem (JUNK *et al*., 2013).

Porém, com as atuais preocupações a respeito das mudanças ambientais que ocorrem no planeta, as áreas alagáveis começam a se tornar objeto de interesse científico e de preservação, pois possuem papel fundamental no balanço global de carbono. Contudo, o conhecimento dessas áreas é bastante limitado devido às dificuldades de acesso, da sua natureza transitória e, em alguns casos, devido às grandes extensões que ocupam (NOVO e COSTA, 2008).

Para a efetiva preservação dessas áreas se faz necessário, em primeiro lugar, conhece-las, saber sua localização geográfica, sua extensão territorial, enfim, é preciso caracterizar essas áreas para que seja possível, posteriormente, inventaria-las. Uma das etapas do processo de caracterização das áreas úmidas é a sua delimitação. Para essa finalidade, o melhor método disponível atualmente é o mapeamento pelo uso de dados de sensoriamento remoto.

Nesse contexto, este trabalho justifica-se pela busca de um método baseado no uso de imagens de Radar de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar –SAR*) para a identificação dos limites sazonais das áreas úmidas, pois esses sensores ativos de micro-ondas possuem habilidades especificas que os diferenciam de outros sensores que utilizam radiação de outras regiões do espectro eletromagnético. Dentre as quais, destacam-se para fins de mapeamento de áreas úmidas: capacidade de transmitir radiação através das nuvens e chuvas; sensibilidade à estrutura macroscópia, o que permite a distinção entre diferentes habitats; sensibilidade a propriedades elétricas dos materiais, que são influenciadas pelo teor de umidade presente nos materiais.

1.2. Objetivos

O objetivo central deste trabalho é monitorar a variação na extensão das áreas úmidas e das áreas inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo em uma série temporal de imagens SAR.

Para alcançar o objetivo central é necessário realizar as etapas descritas abaixo:

- Adaptar um algoritmo computacional para classificação de áreas úmidas em imagens SAR na banda C;
- Adaptar um algoritmo computacional para classificação de áreas inundadas em imagens SAR na banda C;
- Analisar a variação na extensão das áreas úmidas adjacentes ao Canal São Gonçalo, em uma série temporal de imagens ERS-1 e 2 SAR e Envisat ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) adquiridas entre 1992 e 2007, como também os períodos em que essas áreas encontram-se inundadas;
- Analisar os locais em que ocorrem com mais frequência áreas úmidas e/ou inundadas nas áreas adjacentes ao Canal São Gonçalo;
- Estabelecer uma análise comparativa entre áreas úmidas e inundadas e a precipitação, os fenômenos El Niño e La Niña, a velocidade e a direção do vento.

1.3. Área de estudo

Como o objetivo central do trabalho é monitorar a variação na extensão das áreas úmidas e das áreas inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo, a área de estudo foi definida de acordo com a planície de inundação do canal, como mostra a imagem ERS-2 (órbita 496 e ponto 4257 - Figura 1.1).

O Canal São Gonçalo localiza-se no Estado do Rio Grande do Sul, próximo aos municípios de Pelotas e Rio Grande. Possui 76 km de extensão, aproximadamente 250 m de largura e 5 m de profundidade e faz a ligação entre a Lagoa Mirim e a Laguna dos Patos, a maior lagoa costeira da América do Sul. Na várzea do canal situam-se a foz do Rio Piratini, que deságua no canal, e duas principais lagoas, Formosa e do Fragata (Figura 1).

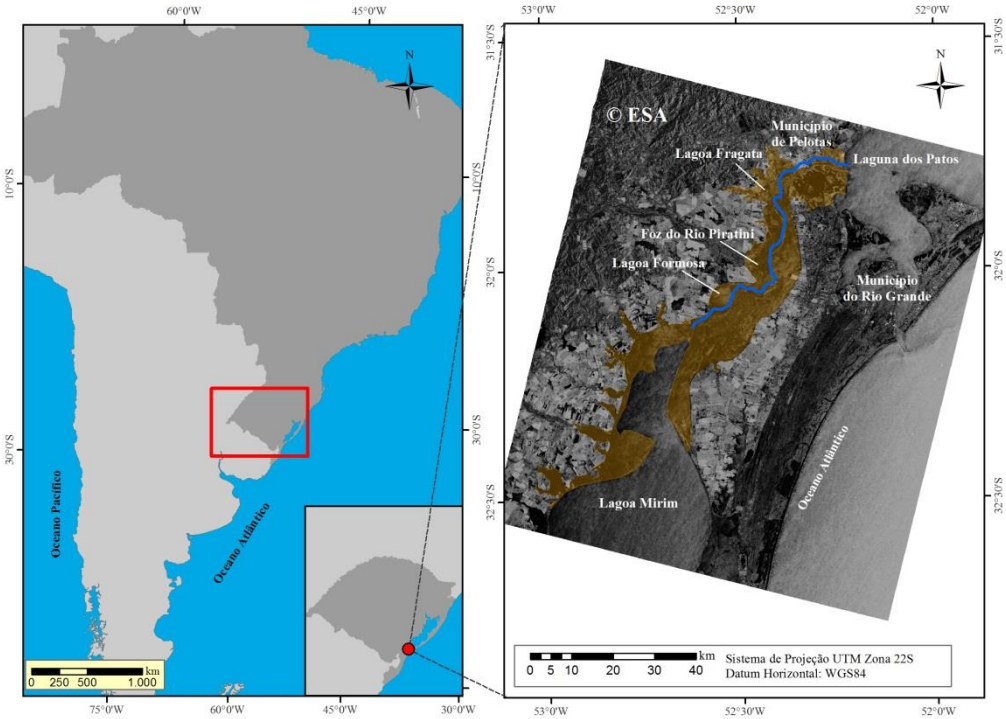

Figura 1.1: Localização da área de estudo. Imagem ERS-2 SAR adquirida em 25 de setembro de 2000. A linha em azul indica o Canal São Gonçalo, e o polígono em volta é o limite máximo aproximado da área de inundação do canal, que foi definida como a área de classificação das imagens.

A formação do canal se deu por meio da Lagoa Mirim, auxiliada pelos processos erosivos impostos pela Lagoa dos Patos aos depósitos pleistocênicos, que acabou por estabelecer um canal de ligação entre as duas lagoas (KOTISIAN e MARQUES, 2004).

Segundo a Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul (SEMA), esta área faz parte da Região Hidrográfica do Litoral e da Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo. Com uma área total de 25.961,04 km^2, essas bacias fazem parte da Planície Costeira e do Escudo Uruguaio-Sul-Rio-Grandense. A região hidrográfica possui diversos cursos d'água, dentre os principais estão: os arroios Pelotas, Passo das Pedras, Basílio, Chasqueiro, Grande, Juncal, Chuí, do Vime, Seival, Minuano, Lageado, Taquara, Candiota, Butiá, Telho, do Quilombo e os rios Piratini e Jaguarão e o Canal São Gonçalo. Os principais usos da água se destinam a irrigação, abastecimento humano e dessedentação animal.

É possível perceber a importância ecológica e ambiental da área de estudo por meio da definição que a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM/RS) dá a região em que o Canal São Gonçalo está inserido:

> A ampla planície costeira que se estende desde o litoral sul do Rio Grande do Sul até a fronteira com o Uruguai, abriga um dos mais relevantes sistemas naturais do Estado, onde os banhados e áreas úmidas, associados a lagoas e cursos d'água, constituem aspecto dominante da paisagem. Nestas áreas destacam-se a Lagoa Mirim e Mangueira, dentre outros corpos d'água (FEPAM, 2013).

A várzea do Canal São Gonçalo é caracterizada pela presença de áreas úmidas como banhados e campos inundáveis com diferentes fisionomias e capões de mata. Caracteriza-se por visadas amplas, tendo como principais elementos paisagísticos as áreas úmidas (Figura 1.2). Abriga populações expressivas de aves ameaçadas e endêmicas, sendo indicada como área de importância para a conservação da avifauna (SOSINSKI, 2009).

Figura 1.2: Paisagem no entorno do Canal São Gonçalo.
Fonte: autora.
Data: 15/05/2013
Local: Antiga ponte que liga os municípios de Pelotas e Rio Grande.

De acordo com Burger (2000), os banhados do Canal São Gonçalo possuem vegetação flutuante, palha, junco, sarandís, e servem de refúgio para aves aquáticas. Junto à foz do canal, no sistema banhado da Barra Falsa, há uma grande extensão de banhados com presença de espécies raras ou ameaçadas de extinção.

O cultivo do arroz irrigado é uma das principais atividades econômicas locais. Em épocas de estiagem, o nível das lagoas baixa, permitindo a entrada de água salgada do oceano na porção sul da Lagoa dos Patos. Nessas condições, inverte-se o sentido da corrente do Canal São Gonçalo e a água salgada segue em direção da Lagoa Mirim. Para evitar a intrusão de água salgada, e assim manter a qualidade da água da região, que é destinada ao uso humano, agrícola e industrial, foi construída em 1977 uma barragem-eclusa, com estrutura que permite a passagem de embarcações em quaisquer circunstâncias (AGÊNCIA DA LAGOA MIRIM - ALM, 2013).

A vazão do canal depende do nível da Laguna dos Patos, das condições de fluxo do rio Piratini, seu principal afluente, e mais recentemente das condições impostas pela Barragem. Já o seu nível relaciona-se, além dos fatores mencionados, com a ação dos ventos, que na maioria das vezes é o fator mais importante. Dessa forma, na região há periódicas variações nas condições hidrográficas devido à evolução dos sistemas atmosféricos (HARTMANN e HARKOT, 1990).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Áreas úmidas

2.1.1. Definição e importância das áreas úmidas

A definição de áreas úmidas mais aceita mundialmente é proposta pela convenção de Ramsar. Porém, diversos autores, mesmo que com certa dificuldade e arbitrariedade, causada pela grande diversidade de habitats que integram essas zonas, definem e caracterizam as áreas úmidas.

Cowardin *et al.*(1979) afirmam que a característica dominante das zonas úmidas são os solos saturados por água, onde comunidades de plantas e animais vivem sobre sua superfície, sendo que para ser uma áreas úmida o solo precisa estar saturado pelo menos periodicamente com uma cobertura de água. Os autores ainda definem zonas úmidas como áreas de transição entre ambientes terrestres e aquáticos onde o lençol freático está geralmente próximo a superfície ou a terra é coberta por água superficial.

De acordo com Neiff (1999), as terras úmidas são planícies com sistemas complexos que envolvem vários ecossistemas. As características dessas zonas estão baseadas nos alagamentos e/ou inundações periódica. O mesmo autor, ao tratar das áreas úmidas da América do Sul, às divide em duas categorias: Grandes áreas úmidas, que incluem os pantanais e áreas úmidas aluviais; e áreas úmidas marginais que dividem-se em fluviais, lacustres e litorais.

Segundo Neiff (1999), a identidade das principais zonas úmidas (também chamadas de *wetlands, bañado*, banhado, brejos) da América do Sul impede a sua caracterização como um ecótono, ou seja, transição ecológica, usado por alguns autores para definir zonas úmidas, pois, funcionalmente estas áreas não são sistemas de transição entre terra e água. De acordo com o autor, isto implica em um erro conceitual que pode ser perigoso não só para o diagnóstico desses sistemas complexos, como também para análise de impacto de qualquer intervenção antrópica.

Rolon e Maltick (2006) definem as áreas úmidas como ecossistemas que permanecem inundados por tempo longo o bastante, que permita o estabelecimento de solos encharcados e

plantas aquáticas. Os autores ainda destacam que esses ecossistemas são prioritários na conservação, pois aportam grande biodiversidade e proporcionam benefícios à população.

As áreas úmidas são de grande importância para sociedade devido aos diversos benefícios que oferecem, pois estas zonas servem para armazenar água, recarregar o lençol freático, reter sedimentos, purificar a água, regular o microclima, manter a biodiversidade e ainda armazenar carbono orgânico (JUNK *et al*., 2013).

Esses ecossistemas fornecem bem-estar à população, principalmente devido aos recursos pesqueiros que aportam e também pela disponibilidade de água. O principal abastecimento de água doce renovável provém de zonas úmidas interiores incluindo lagos, rios, pântanos e aquíferos subterrâneos pouco profundos. As águas subterrâneas, que são muitas vezes recarregadas através de zonas úmidas, também desempenham um importante papel no abastecimento de água para a população. *Millenium Ecosystem Assessment* (2005) aponta outras utilidades das zonas úmidas para o bem estar da população, são elas:

- Purificação da água e desintoxicação de resíduos;
- Regulação climática;
- Mitigação das mudanças climáticas;
- Regulação hidrológica: controle de enchentes, recarga do lençol freático e regulagem do fluxos dos rios.

2.1.2. Áreas úmidas e a área de estudo

As áreas úmidas costeiras englobam diversos ecossistemas, como as lagoas de água doce ou salobra sem influência marinha, savanas, campos e florestas de inundação temporária ou permanente e os banhados. Os banhados são áreas que podem ser alagadas temporária ou permanentemente, e são conhecidos na maior parte do Brasil como brejos, pântanos, charcos, pantanal, varjões e alagados, entre outros (BURGER, 2000). A autora ainda destaca que os banhados são apenas um dos tipos ambientais incluídos na categoria de áreas úmidas, que possui diversos conceitos relacionados e na sua grande maioria confusos.

Como estas áreas situam-se em um contínuo entre as de ambiente aquático e terrestre, as definições tendem a ser arbitrárias (Mitsch & Gosselink, 1993, apud, Gazulha, 2004). No entanto, os mesmos autores afirmam que as características mais notáveis que permitem distinguir estas áreas dos ambientes aquáticos e terrestres são a presença de água, os solos hídricos e a vegetação adaptada ou tolerante aos solos saturados.

No Rio Grande do Sul, por influência dos seus países vizinhos, as áreas úmidas são chamadas de banhados, que é uma expressão originada do espanhol “bañado”. Segundo Carvalho e Ozorio (2007), os banhados formam-se em regiões planas resultantes de sedimentação ou encordoamentos paralelos à linha de costa, onde a água doce é represada e flui lentamente. A água que abastece os banhados é proveniente de corpos hídricos próximos e/ou afloramentos do lençol freático e das precipitações pluviométricas. Os banhados ainda podem ter ligação direta com outros corpos hídricos, desenvolvendo-se na planície de inundação, ligando-se com lagoas e rios apenas nos períodos de cheia, ou serem isolados.

As áreas úmidas adjacentes ao Canal São Gonçalo possuem grande extensão e desenvolvem-se na planície de inundação do canal. De acordo com Tagliani e Vicens (2003), nas margens do Canal São Gonçalo ocorre uma vegetação de banhado com predomínio de uma flora palustre de juncáceas e ciperáceas (Figura 2.1).

Figura 2.1: Vegetação predominante nas margens do Canal São Gonçalo. Observe que a vegetação é de plantas herbáceas, com predomínio de juncáceas com folhas lineares.
Fonte: autora.
Data: 15/05/2013
Local: Antiga ponte que liga os municípios de Pelotas e Rio Grande.

As áreas de banhados podem ser inundadas temporariamente ou permanentemente. No Canal São Gonçalo, os períodos de inundação são temporários, permanecendo na maior parte do tempo, a vegetação acima da lâmina d’água.

Segundo Hartmann *et al.* (1986) o Canal São Gonçalo é uma das regiões que mais sofrem inundações no Rio Grande do Sul, as quais são mais frequentes nos meses de inverno.

Ainda de acordo com os autores, essas inundações ocorrem devido à baixa declividade do canal, com a atuação dos ventos e com os níveis de água de ambas as lagunas que ele interliga, associados aos regimes de precipitação.

Neste estudo serão utilizados os termos áreas úmidas para designar as áreas de banhado e áreas inundadas para as áreas onde a lamina d'água seja aparente, ultrapassando o limite da vegetação no entorno do canal.

2.1.3. Áreas úmidas: inventário e caracterização

A distribuição das áreas úmidas no Rio Grande do Sul é bastante heterogênea, com grande concentração na Planície Costeira, Depressão Central e Cuesta (MALTCHIK *et al*., 2003). Ainda de acordo com os autores, no estado do Rio Grande do Sul ocorrem um total de 3.441 zonas úmidas, que resultam em 30.332 km².

Carvalho e Ozorio (2007) complementam o acima exposto frisando que para garantir a integridade dos banhados do Rio Grande do Sul é de suma importância que se conheça os ecossistemas em termos de localização espacial, estrutura, tipificação e funcionalidade. Segundo Rolon e Maltchik (2006), para que essas áreas sejam estudadas e conhecidas de uma forma mais precisa, elas devem ser classificadas e inventariadas. A classificação significa definir os tipos ou categorias de áreas úmidas, com base em caraterísticas como hidrologia, geomorfologia, tipo de solo e vegetação, ou seja, parâmetros naturais. Já o inventário determina a quantidade, a extensão e a distribuição das zonas úmidas (ROLON e MALTCHIK, 2006). Para apoiar o desenvolvimento de políticas de conservação e uso sustentado dessas áreas, é fundamental um inventário e caracterização dessas zonas.

O grande número de termos que servem para designar estas zonas demonstra a falta de uma classificação concisa, o que pode causar confusão quando se tratam de áreas úmidas com diferenças geomorfológicas e climáticas, mas que devido à falta de uma literatura com rigor científico podem ser nomeadas pelo mesmo termo, prejudicando a comparação entre as diversas áreas úmidas existentes no planeta. A legislação ambiental no Brasil prevê, em alguns aspectos, a proteção das áreas úmidas, porém não há uma classificação nacional dessas áreas ou uma Lei Federal específica.

2.1.4. Áreas úmidas e problemáticas ambientais

Devido à diversidade que aportam e as extensas áreas que ocupam, muitas vezes as áreas úmidas sofrem diversas problemáticas ambientais, que podem ser aceleradas por meio do mau uso dos recursos locais. Na área de estudo, as principais problemáticas são causadas pelo cultivo de arroz irrigado, que ocorre próximo a esses ambientes devido demanda de água, e também às áreas de pastagens, que instalam-se nas áreas úmidas devido ao predomínio de áreas planas e terras férteis para o plantio do alimento dos animais, o que facilita o cultivo do gado.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2006), o sul do estado do Rio Grande do Sul, onde está localizada a área de estudo, mantém os padrões de ocupação vigentes do início do século XX, baseado em extensas propriedades onde se pratica a pecuária e a rizicultura irrigada em larga escala.

A produção da rizicultura, produção de arroz ou, como também é conhecida, orizicultura em grande escala teve início no Rio Grande do Sul para atender à exportação, na primeira década do século 20 (BESKOW, 1984). Por ser uma cultura que se instala próxima aos cursos d'água, acaba por modificar e impactar a região. Os banhados são exemplos de ecossistemas bastante prejudicados com a presença da rizicultura, pois eles são drenados para irrigar e dar lugar à cultura de arroz.

Dentre os impactos que a rizicultura oferece aos ecossistemas de banhado estão: redução das áreas naturais devido à drenagem; retirada da vegetação; compactação e salinização do solo; variação do nível do lençol freático; eutrofização; erosão e/ou assoreamento; envenenamento da fauna e flora devido à contaminação da água por agrotóxicos; escassez de água e ainda o riscos decorrentes da monocultura (CARVALHO e OZORIO, 2007).

Dados da FEPAM (2013) apontam a rizicultura como um dos principais conflitos enfrentados pela conservação das áreas úmidas e da biodiversidade, pois esta é uma atividade econômica significativa na região, o que a torna dominante na paisagem. O órgão ainda afirma que os principais impactos causados pelo cultivo nessas áreas são a alteração do regime hidrológico e a contaminação da água através dos agrotóxicos.

Daronch *et al*. (2006), destacam a bonivicultura como uma atividade também impactante nas áreas de banhado, porém contraditória à rizicultura, pois enquanto os rizicultores querem a lâmina d'água espessa para irrigar as lavouras, aos criadores de gado

interessa que o banhado esteja no nível mais baixo possível para aumentar as áreas de pastagem.

Extensas áreas próximas ao Canal São Gonçalo são ocupadas para a prática da rizicultura, como é possível verificar na imagem figura 2.2. As áreas de pastagens também ganham espaço ao longo do tempo nas adjacências do canal (Figura 2.3). Nas áreas próximas à ponte que liga o município de Rio Grande ao de Pelotas é possível analisar essas atividades, bem como a ocupação de algumas áreas bastante próximas aos banhados do canal com moradias (Figura 2.4).

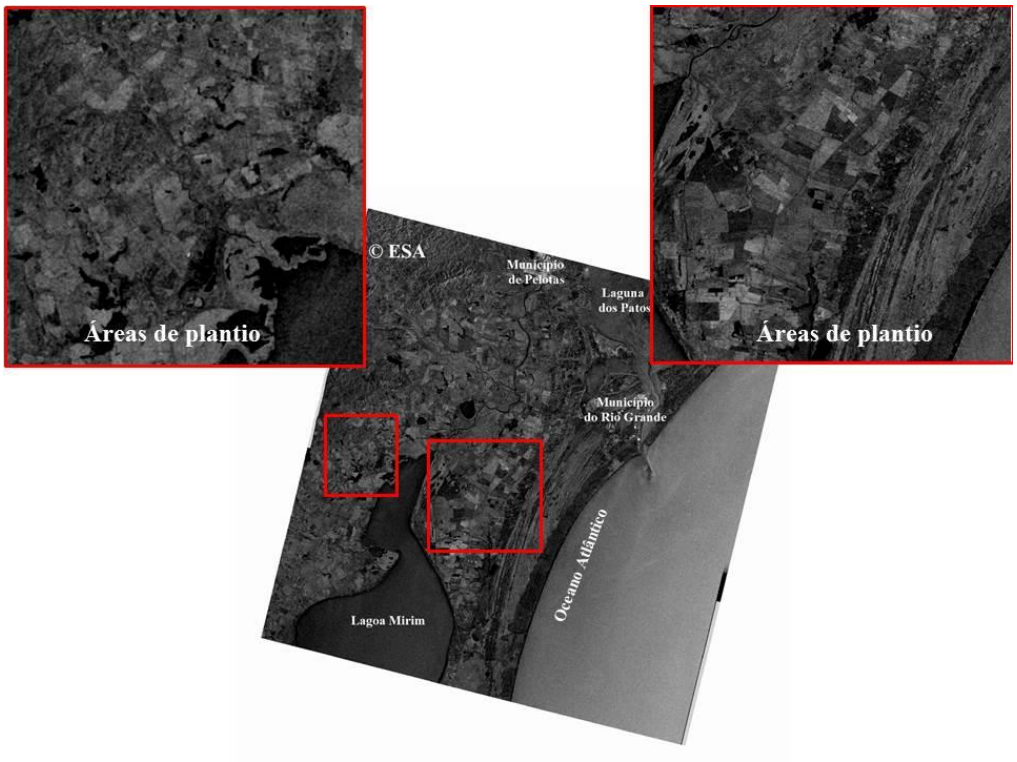

Figura 2.2: Áreas de plantio nas proximidades do Canal São Gonçalo. Imagem ENVISAT ASAR adquirida em 26/02/2007.

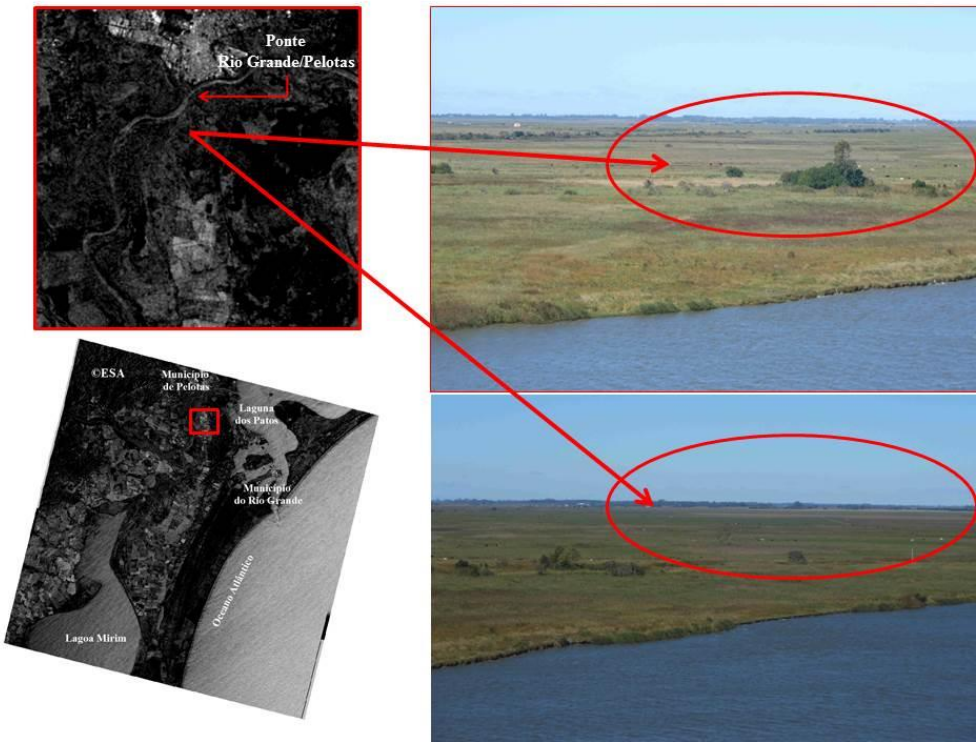

Figura 2.3: Áreas de pastagem ao longo do Canal São Gonçalo. À esquerda a imagem ENVISAT ASAR adquirida em 04/09/2006 abaixo, e acima detalhe das áreas onde localizam-se as pastagens. À direita estão as imagens das pastagens que estão representadas na imagem ENVISAT.

Figura 2.4: Usos múltiplos no entorno do Canal São Gonçalo.
Fonte: autora.
Data: 15/05/2013
Local: Antiga ponte que liga os municípios de Pelotas e Rio Grande.

O impacto ambiental causado por drenar um banhado é pouco avaliado pela população por não gerar consequências imediatamente visíveis (DARONCH *et al*., 2006). Os agricultores, na época de maior demanda que são os meses de janeiro e fevereiro, tem a prática de bombear ininterruptamente a água dos rios para as lavouras, interferindo na vazão e também na distribuição dos seres vivos nesses cursos d'água.

2.1.5. Áreas úmidas e legislação ambiental

Não há uma legislação ambiental federal específica para as áreas úmidas. Porém, é possível interpretar algumas legislações existentes que preveem a preservação dessas áreas de acordo com a sua localização. A Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, no seu Capítulo II Seção I, que dispõe sobre a delimitação das áreas de preservação permanente, no seu Art. 4º considera áreas de preservação permanente, em zonas rurais e urbanas, as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular até alguns metros, que variam de acordo com a largura dos cursos d'água. Assim, é possível perceber que as áreas úmidas, por localizarem-se próximas aos cursos d'água, acabam por ser inclusas, mesmo que apenas em partes, nas áreas de preservação permanente previstas na Lei Federal citada.

Já a legislação ambiental específica do Rio Grande do Sul, através da Lei Estadual nº 11.520, de 03 de agosto de 2000, que institui o Código Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul e dá outras providências, possui alguns artigos que preveem a preservação das áreas de banhado. Por exemplo, o Art. 51, dispõe que os banhados são áreas de uso especial, onde além das áreas integrantes do sistema estadual de unidades de conservação, são também objeto especial de proteção. Já o Art. 155 da mesma lei considera de preservação permanente as áreas, a vegetação nativa e demais formas de vegetação, situada, dentre outros, em banhados. Ainda na mesma lei, no Art. 241 consta que na Zona Costeira deverão ser protegidas algumas áreas, onde somente serão permitidos usos que garantam a sua preservação. Dentre as áreas estão os banhados e várzeas utilizados significativamente como áreas de alimentação, reprodução, abrigo e refúgio para espécies de fauna nativa, assim definidos pela FEPAM.

Portanto, no Estado do Rio Grande do Sul existem na legislação ambiental artigos que dispõe sobre a preservação das áreas de banhado, porém, como citado em parágrafos anteriores, ainda é perceptível a falta de um inventário e classificação das áreas úmidas do Estado, para que seja possível implementar políticas diretas à essas áreas e também tornar público o conhecimento da existência e localização do maior número possível de áreas úmidas no Estado do Rio Grande do Sul.

2.2. Radar de abertura sintética

2.2.1. Características e componentes do radar

Os radares de abertura sintética (SARs) são sensores ativos baseados na transmissão de micro-ondas de comprimentos de onda longos (*e.g.*, entre 3 e 25 cm) através da atmosfera e na detecção da quantidade de energia retroespalhada pela superfície do terreno (JENSEN, 2011). As imagens de radar podem ser geradas pelo sistema de radar aerotransportado de visada lateral (*side-looking airborne radar* – SLAR) ou a partir de sensores orbitais, e a principal vantagem desse sistema é a habilidade de obter imagens com faixas contínuas de terrenos extensos, paralelamente ao deslocamento da plataforma (LILLESAND *et al.*, 2004).

O pulso de radiação eletromagnética enviada pelo transmissor através da antena tem duração e comprimento de onda específicos. Os comprimentos de onda e frequências de radar mais comumente utilizados nas investigações de sensoriamento remoto por micro-ondas ativas são descritos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Comprimentos de onda e frequências de radar usados em sensoriamento remoto por micro-ondas ativas.

Designação das bandas de Radar (comprimentos de ondas mais comuns)	**Comprimento de onda (λ) em cm**	**Frequência (υ) em GHz**
K_a	0,75 – 1,18	40,0 – 26,5
K	1,19 – 1,67	26,5 – 18,0
K_u	1,67 – 2,4	18,0 – 12,5
X (3,0 e 3,2 cm)	2,4 – 3,8	12,5 – 8,0
C (7,5; 6,0 cm)	3,9 – 7,5	8,0 – 4,0
S (8,0;9,6; 12,6 cm)	7,5 – 15,0	4,0 – 2,0
L (23,5; 24,0; 5,0 cm)	15,0 – 30,0	2,0 – 1,0
P (68,0cm)	30,0 – 100,0	1,0 – 0,3

Fonte: Adaptada de Jensen, 2011.

De acordo com Jensen (2011), existem diversas vantagens na utilização de sensoriamento remoto por radar, dentre elas:

- Algumas frequências de micro-ondas penetram as nuvens, permitindo o sensoriamento remoto em diferentes condições meteorológicas. Nesse caso, a cobertura por satélite de regiões frequentemente cobertas por nuvens é possível;
- É possível obter uma visão sinóptica de grandes áreas para mapeamento em escalas de 1:10.000 a 1:400.000;
- O radar atua em comprimentos de onda fora das regiões do espectro eletromagnético óptico e infravermelho, sendo capaz de fornecer informações sobre rugosidade superficial, propriedades dielétricas e conteúdo de umidade;
- Baseia-se em sua própria fonte de energia, podendo controlar o ângulo de iluminação;
- Permite que a resolução azimutal seja independente da distância ao objeto, com tamanhos de células de resolução de até 1 m;
- As imagens podem ser produzidas com diferentes tipos de energia polarizada (HH, HV, VV, VH); e.
- A técnica de sensoriamento remoto por radar tem potencial de aquisição de dados com multifrequência.

2.2.2. Características geométricas do imageamento por radar

Para melhor entender o desempenho desse sistema, é necessário compreender alguns parâmetros sobre o pulso de energia de micro-ondas que é enviado para a superfície terrestre. A configuração típica de um SLAR é baseada na montagem da antena abaixo e paralela à fuselagem da aeronave, a qual trafega em uma linha reta denominada de direção de azimute do voo (Figura 2.5). Os pulsos ativos de micro-ondas enviados pela antena iluminam faixas do terreno formando ângulos retos com a direção de voo. A direção de iluminação é denominada de direção de alcance (*range*). Nesta faixa iluminada pelo pulso de energia, ainda existem mais duas definições de alcance. A que fica próxima da linha da aeronave, ao longo da linha de visada, é o alcance próximo (*near range*), enquanto o ponto mais distante iluminado é chamado de alcance distante (*far range*) (JENSEN, 2011).

A medida entre o plano horizontal, que se estende a partir da fuselagem da aeronave, e o pulso de energia da antena ao longo da linha de visada do radar em um ponto específico do terreno é o ângulo de depressão. Esse ângulo varia do *near* ao *far range*, sendo o ângulo médio de depressão a medida entre dois pontos. Já a medida entre a vertical da antena, a superfície do terreno e a linha de visada do radar é denominada de ângulo de visada, o qual também varia entre o *near* e o *far range*, complementando o ângulo de depressão. Ainda há o ângulo de incidência que é formado entre o pulso de energia do radar e a linha perpendicular à superfície terrestre, no ponto onde o pulso faz contato. Se a superfície do terreno é plana, ou seja, apresenta baixa declividade, o ângulo de incidência é o complemento do ângulo de depressão (JENSEN, 2011).

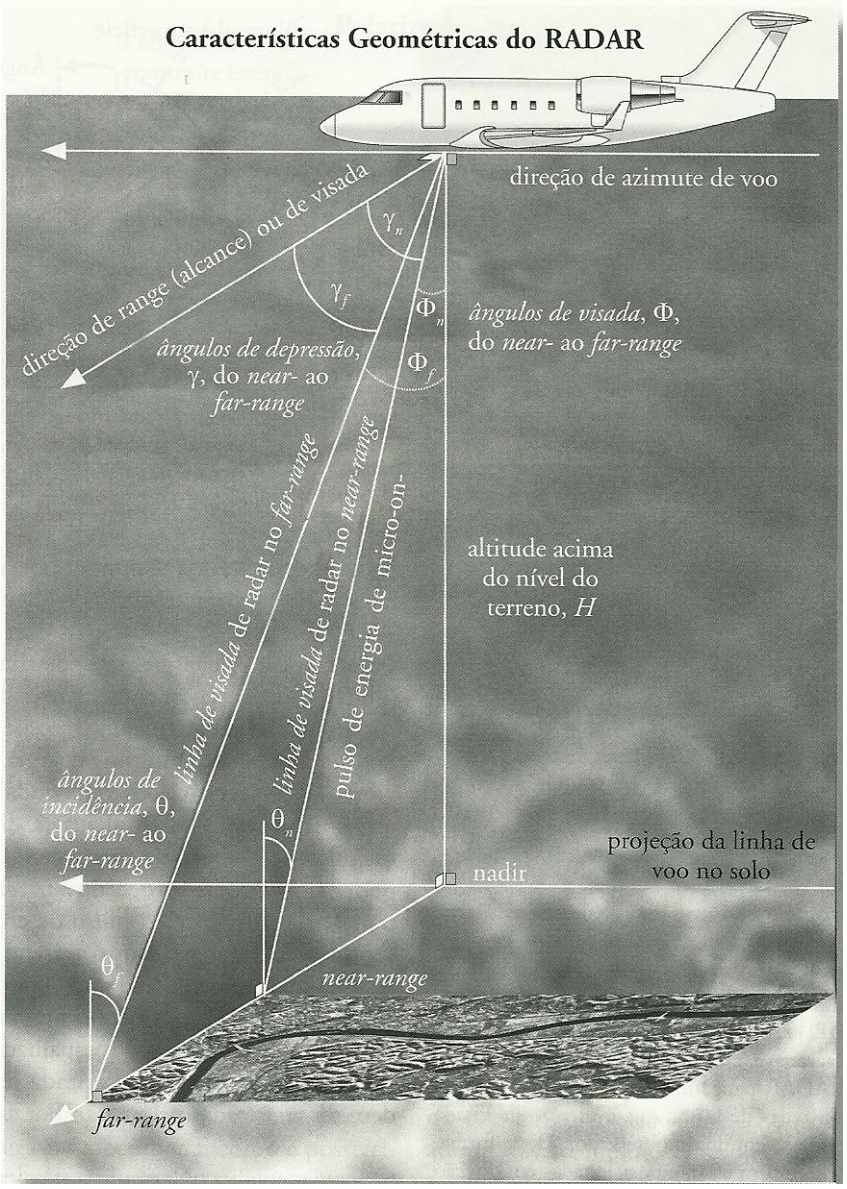

Figura 2.5: Características geométricas do imageamento adquirido por um SLAR.

Fonte: Jensen, 2011.

O radar possui uma geometria de imageamento bastante específica, portanto é necessário considerar essas características quando são realizadas medições radarmétricas. A imagem de radar que ainda não foi corrigida é aquela que se apresenta na geometria do alcance inclinado, e está baseada na distância real entre o radar e cada uma das feições presentes na cena. É possível converter essas informações de geometria alcance inclinado (*slant-range* (Srd)) para alcance no terreno (*ground-range* (Grd)) projetando-as no eixo x de maneira que as feições da cena mantenham, umas em relação às outras, as suas propriedades reais de posicionamento planimétrico na imagem final de radar (Figura 2.6). Ainda é possível

transformar de alcance inclinado para alcance no terreno usando a altura da antena acima do nível local do terreno, H, e o ângulo de depressão (γ) no ponto de interesse (JENSEN, 2011).

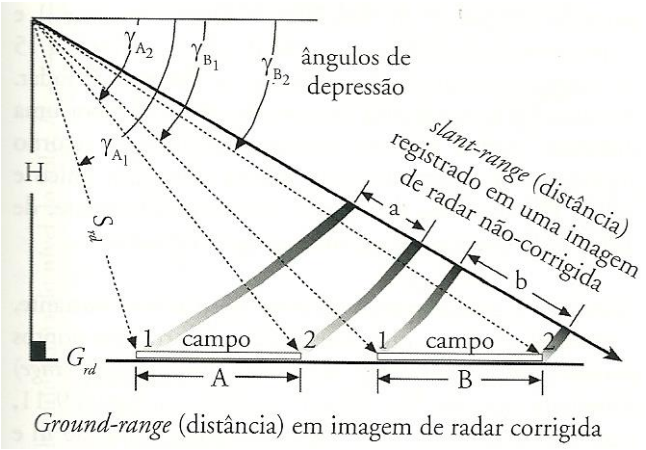

Figura 2.6: Imagem em alcance inclinado e imagem em alcance no terreno.

Fonte: Jensen, 2011.

A propagação da radiação eletromagnética possui três campos de vetores que são mutuamente ortogonais. A direção da propagação é um dos vetores, e os campos elétrico e magnético compõem os outros dois vetores. A energia de micro-ondas ativas tem seu componente de polarização definido pelo vetor do campo elétrico da radiação. O componente de polarização pode ser descrito como linear (ou plano), circular ou elíptico, sendo a polarização linear a mais comum. Os sistemas de radar polarizados linearmente operam usando radiação de micro-ondas polarizada vertical ou horizontalmente. Uma vez que o vetor do campo elétrico é paralelo ao eixo vertical, a onda será polarizada verticalmente. Por outro lado, se o vetor do campo elétrico for paralelo ao eixo horizontal, a onda será polarizada horizontalmente. Nos sistemas ativos, a polarização da energia é considerada tanto para a transmissão como para recepção e as polarizações lineares podem ser misturadas e combinadas para fornecer os quatro tipos mais comuns: HH, VV, HV e VH (LEWIS *et al.*, 1998).

Outro parâmetro de grande importância que auxilia na interpretação das imagens de radar é a resolução. Nos sistemas de radar ela é definida em duas direções: paralela ou perpendicular à linha de voo. A resolução paralela à linha de voo é a resolução de azimute e a perpendicular é a resolução de alcance. Além disso, a resolução do azimute varia com o tipo de sistema de radar: abertura real ou sintética (Figura 2.7) (LEWIS *et al.*, 1998).

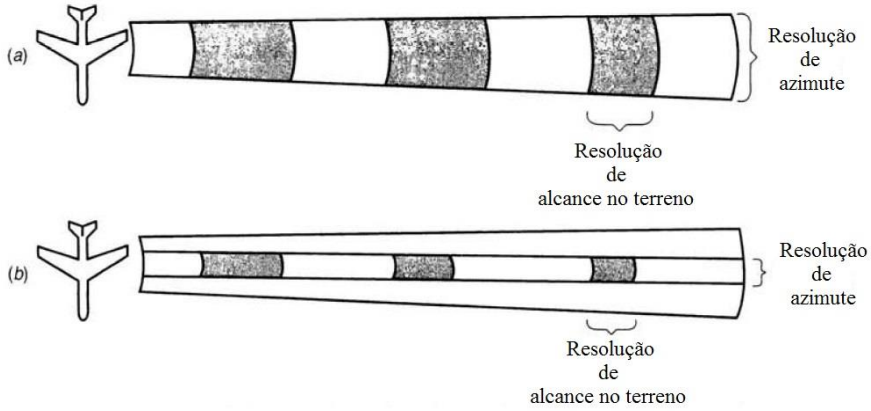

Figura 2.7: Variação da resolução espacial do radar de abertura real (a) e do radar de abertura sintética (b).

Fonte: Adaptado de Lillesand *et al*., (2004).

A resolução em alcance é diretamente relacionada ao comprimento do pulso transmitido pelo radar. Quanto menor o comprimento do pulso, melhor é a resolução em range (LEWIS *et al*., 1998). O pulso deve seguir uma trajetória até o alvo e retornar ao sensor, portanto, é necessário dividir o comprimento do pulso por dois para se medir a resolução em alcance inclinado. Para escaloná-la para a resolução em alcance no terreno é necessário multiplicá-la pelo cosseno do ângulo de depressão (γ) (JENSEN, 2011).

Ainda de acordo com Jensen (2011), a regra geral é que sinais refletidos a partir de dois objetos distintos no terreno podem ser individualizados se suas respectivas distâncias em alcance estão separadas por, pelo menos, metade do comprimento do pulso. Portanto, a mínima distância entre dois pontos na cena que podem ainda ser separados é denominada de resolução de range (ELACHI *et al*., 2006).

A resolução em azimute é determinada pelo cálculo da largura da faixa do terreno que é iluminada pelo pulso de radar. Os radares de abertura real produzem pulsos na forma de lóbulos que são estreitos no alcance próximo e alargam-se no alcance distante (Figura 2.8), sendo a largura angular do lóbulo diretamente proporcional ao comprimento de onda do pulso de energia transmitida. Portanto, em radares de abertura real, pulsos com comprimentos de onda menores resultarão na melhor resolução em azimute. Por outro lado, os comprimentos de onda menores, são aqueles que apresentam a menor capacidade de penetração na atmosfera e na vegetação (JENSEN, 2011), uma das grandes vantagens de utilização dos sistemas radar.

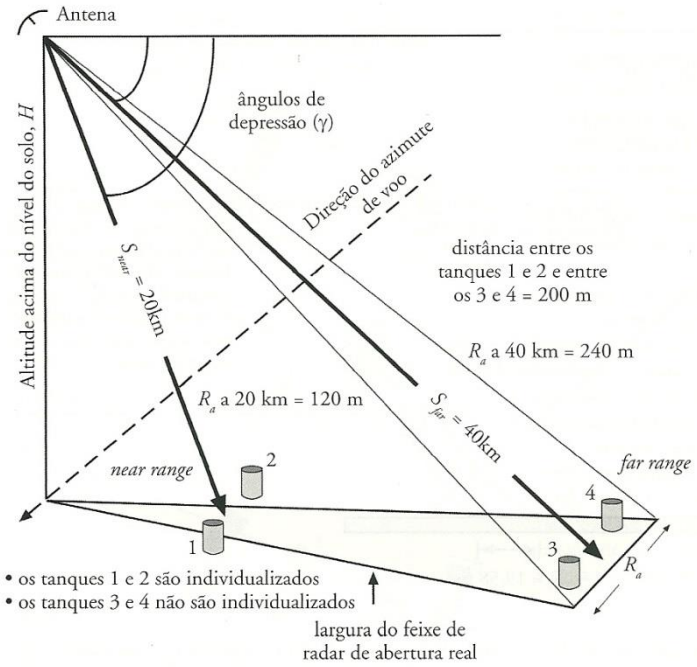

Figura 2.8: Diferença da resolução em azimute no alcance próximo e no alcance distante.

Fonte: Jensen, 2011.

Segundo Lewis *et al*., (1998), ainda há outro parâmetro, além do menor comprimento de onda, que melhora a resolução de azimute na imagem de radar: o aumento do comprimento da antena. Porém, este também possui limitações, pois há um limite prático para o tamanho da antena devido ao tamanho da aeronave e regras das agências responsáveis pela navegação aérea, considerando a estabilidade do desenho da aeronave.

Jensen (2011) considera o Radar de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar* – SAR) o principal avanço em sensoriamento remoto por radar, pois através desse sistema foi possível obter a melhora na resolução de azimute. Engenheiros desenvolveram procedimentos para simular eletronicamente uma antena de um tamanho muito grande. Assim, o SAR utiliza uma antena pequena, assim como o radar de abertura real, porém a antena do SAR envia um feixe de radar relativamente amplo, perpendicularmente à aeronave. A diferença está no número maior de pulsos que é enviado em direção ao objeto. Esse sistema utiliza os princípios do efeito *Doppler* para monitorar o retorno dos pulsos adicionais de micro-ondas e sintetizar o tamanho da antena e consequentemente a resolução em azimute, a fim de obter um feixe de radiação bastante estreito.

De acordo com Jensen (2011), uma imagem de radar é a representação bidimensional da potência de retorno do radar de uma área específica no solo, que representa um elemento

de imagem (pixel). Ainda de acordo com o autor, a porcentagem de energia eletromagnética refletida por uma célula de resolução é chamado de coeficiente de retroespalhamento (σ^o).

2.2.3. Imagens de radar e o mapeamento de áreas úmidas

O uso de dados SAR para o mapeamento de áreas úmidas é provado através de diversas investigações, dentre as quais se destacam: Paradella *et al.* (1996), Ozesmi e Bauer (2002), Moghaddam e McDonald (2003), Novo (2006), Novo e Costa (2008), Touzi *et al.* (2007), Teixeira (2011), Bourgeau-Chavez *et al.* (2012), Marinho *et al*. (2012). Devido ao caráter sinóptico dos dados de sensoriamento remoto, o que favorece a obtenção de informações instantâneas sobre amplas áreas, os estudos de áreas alagadas têm se beneficiado bastante nos avanços dessa tecnologia, principalmente a partir da década de 1990, com o advento dos radares orbitais. Atualmente os dados de radar têm sido utilizados com grande sucesso para o estudo de áreas alagadas em várias regiões geográficas do planeta (NOVO e COSTA, 2008).

As autoras citadas acima ainda salientam que satélites que operam na faixa do espectro óptico são eficientemente utilizados para estudo das áreas alagadas. Porém, a presença de nuvens constantes em algumas regiões, como as tropicais, a grande variação radiométrica de imagens adquiridas por diferentes sensores e em diferentes épocas do ano, bem como a limitada capacidade de detecção da lâmina d'água abaixo da vegetação, limitam o uso contínuo e único de dados ópticos para este tipo de estudos. Desde a última década do século XX, vários autores vêm demonstrando o uso eficiente de dados de radar para o mapeamento e monitoramento de áreas inundáveis (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Metodologias de classificação de áreas alagáveis em diversos locais do planeta, citando o autor, o sensor utilizado, as classes adotadas e a precisão do método.

Autor	Sensor	Classes	Método	Treinamento/teste	Precisão
Le Toan *at al*. (1997) Indonésia	ERS	Arroz inundado/não arroz	Razão de imagens temporais	-----	-----
Ribbes e Le Toan, (1999) Indonésia	RADARSAT	Arroz inundado/não arroz	Razão de imagens temporais	Mapa da região	88%
Augusteijn e Warrender (1998) Estados Unidos	AIRSAR	Alagado/não alagado	Rede neural	70 amostras p/classe	80%
Murphy *et al*. (2001) Canadá	RADARSAT	Floresta e arbustos alagados, plantas aquáticas	ISODATA	Não supervisonada	82%
Arzandeh e Wang (2002) Canadá	RADARSAT	Floresta, uso e plantas aquáticas	Textura e máxima Verossimilhança	Centenas de pixels p/ classe	71%
Parmuchi *et al*. (2002) Argentina	RADARSAT	Floresta e arbustos alagados, plantas aquáticas	Árvore de decisão	200/100 pixel p/ classe	85%
Milne e Dong (2002) Austrália	JERS	Floresta, floresta alagada e de mangue	Medidas de textura e segmentação	Não supervisonada	-----
Simard *et al*. (2002) África	JERS e ERS	Floresta inundada e de mangue, plantas aquáticas e terra firme	Árvore de decisão e medidas de textura	-----	84%

Fonte: Adaptada de Novo e Costa (2008).

Os radares de abertura sintética, por possuírem múltipla frequência e polarização, são adequados para localizar os limites de zonas úmidas, pois tem a capacidade de detectar várias combinações de água parada, estrutura de vegetação e condições de umidade. Além disso, os sensores SAR penetram a cobertura de nuvens e não requerem iluminação solar, o que permite coleta de dados frequentes e sazonais (MOGHADDAM e MCDONALD, 2003),

A água, que é o elemento controlador da tipologia das áreas alagadas, é de grande importância para a aplicação de dados SAR, pois ela afeta a constante dielétrica da superfície e consequentemente seu coeficiente de retroespalhamento (NOVO, 2006). Porém, essas áreas raramente apresentam-se sem cobertura vegetal, sendo assim, a radiação de micro-ondas interage primeiramente com a vegetação. Portanto, se faz necessário o conhecimento da interação da radiação de micro-ondas com os dosséis da vegetação para a aplicação das imagens SAR em estudos de áreas alagadas.

Ozesmi e Bauer (2002) abordam o uso concomitante de imagens ópticas e SAR para o mapeamento de áreas inundadas e destacam que essa combinação ainda pode ser mais explorada e que o RADAR é útil para o estudo de áreas úmidas devido à capacidade que possui em distinguir entre áreas com a presença de água e áreas sem a presença de água. Além

disso, os autores complementam a capacidade de aquisição de dados SAR em quaisquer condições meteorológicas, característica bastante importante para o estudo de áreas com frequente cobertura de nuvens.

Ao analisar imagens SAR e ASAR no entorno do Canal São Gonçalo observa-se a capacidade desses dados em distinguir as diferentes feições que contemplam a planície de inundação do canal. As áreas úmidas, localizam-se em grande parte da planície, mas existem diversos corpos d'água, como o próprio canal e as lagoas adjacentes, e ainda as áreas de rizicultura que contemplam diversas áreas na imagem (Figura 2.9).

Sabendo-se que o coeficiente de retroespalhamento real para uma superfície depende de diversos parâmetros do terreno, como geometria, rugosidade superficial e conteúdo de umidade (Jensen, 2011) pode-se afirmar, de acordo com a figura 2.9, as diferentes feições que contemplam a paisagem da área de estudo, de acordo com diferenças nos valores de retroespalhamento, resultantes das diferenças na rugosidade superficial nas áreas úmidas, onde há presença de vegetação, para as áreas abertas de água, que apresentam-se mais lisas. Nas áreas inundadas há um retroespalhamento com intensidade máxima na direção oposta, com o mesmo ângulo de incidência da radiação. Por isso resultam em valores baixos de retroespalhamento representados pelas tonalidades mais escuras na área junto ao canal. Já nas áreas úmidas, há um forte espalhamento na superfície da água, com espalhamento de volume pela vegetação, que recebe a energia diretamente do sensor e também a radiação refletida pela água.

Também é possível diferenciar as áreas cultivadas das demais áreas devido às formas das culturas e também das diferenças de coeficiente de retroespalhamento, causado, também pelo espalhamento de volume, devido a estrutura dos ramos e folhas das plantas (Figura 2.9). Além disso, algumas áreas mais claras próximas à várzea do canal, podem ser associadas às áreas de pastagens, como é possível verificar na figura 2.9.

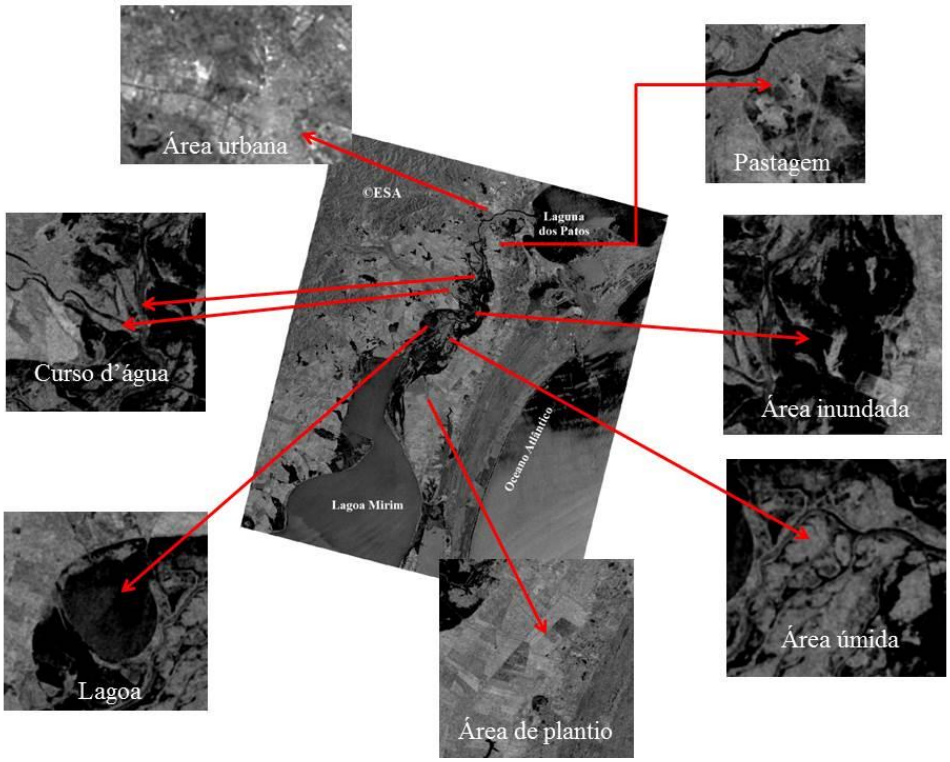

Figura 2.9: Diferentes alvos passiveis de identificação em imagens SAR. Imagem ERS-2 adquirida em 21/08/2000.

A melhora na qualidade das imagens, a fim de colaborar com uma melhor análise, pode ser alcançada por meio de processamento digital das imagens, que através de processos automatizados ou semi-automatizados melhora a qualidade das imagens digitais.

2.2.4. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto

O processamento digital de imagens consiste na execução de operações matemáticas dos dados, visando as suas transformações em imagens com melhores qualidades espectrais e espaciais e que sejam mais apropriadas para uma determinada aplicação. Isso porque o processamento digital de imagens de sensoriamento remoto é orientado para cada tipo de problema, o que significa que uma técnica que é eficaz na remoção de ruídos em uma imagem, da qual interessa apenas a textura e não tanto a remoção de bordas, pode não ser tão eficaz para identificar as altas frequências que caracterizam as mudanças de padrões em áreas urbanas (MENESES e ALMEIDA, 2012).

O processamento digital de imagens possui três etapas independentes: pré-processamento, realce de imagens e análise de imagens. No pré-processamento, são aplicados

alguns procedimentos que visam minimizar ao máximo as distorções das imagens. Já o realce de imagens serve para modificar, através de funções matemáticas, os níveis de cinza ou valores digitais de uma imagem, a fim de destacar alguma informação espectral que facilite o processo de análise. E por último, a análise das imagens consiste na extração de informações das cenas (SANTOS *et al*., 2010).

2.2.5. Pré-processamento

Nas atividades do pré-processamento, está incluso o tratamento inicial dos dados brutos, objetivando sua calibração radiométrica, a correção de distorções geométricas e a remoção de ruídos. (NOVO, 2010). Ou seja, as técnicas de pré-processamento utilizam funções operacionais que servem para remover ou corrigir os erros e as distorções introduzidos nas imagens pelos sistemas sensores devido a erros instrumentais, interferências da atmosfera e à geometria do imageamento (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Os erros radiométricos são originados de falhas instrumentais e limitações do próprio processo de imageamento. Essas falhas geram alterações nos níveis de cinza de cada elemento da imagem (SANTOS, 2010). A correção radiométrica das imagens é uma das etapas mais importantes do processamento digital de imagens, pois caso essas distorções não sejam corrigidas, elas podem ser realçadas em etapas posteriores (ROSA, 1990).

No caso das imagens de RADAR, é necessário aplicar a correção radiométrica para que os pixels possam representar verdadeiramente o retroespalhamento da superfície refletora. O coeficiente de retroespalhamento do radar é um número adimensional que define o comportamento do espalhamento de todos os elementos contidos em uma determinada célula do terreno. Como o σ^o pode variar por diversas ordens e magnitude, ele é calibrado e é expresso como logaritmo em unidades de decibéis (dB) que normalmente variam de -5 a +40 dB (JENSEN, 2011).

Além disso, é preciso aplicar a correção radiométrica quando se faz a comparação entre imagens SAR adquiridas por diferentes sensores, em diferentes datas ou modos de aquisição (ESA, 2012).

Outro processamento necessário para processar imagens de RADAR é a filtragem do speckle. O speckle é uma característica de aspecto granulado presente nas imagens de radar devido a interferência aleatória construtiva e destrutiva entre os sinais de retorno, que produz áreas aleatórias claras e escuras nas imagens (ARONOFF & PETRIE, 2005). Ainda de acordo

com os autores o speckle pode ser reduzido, por meio de técnicas de aprimoramento da imagem, mas não pode ser eliminado.

A atmosfera pode alterar radiometricamente uma imagem por completo, e a intensidade de efeitos dessa degradação depende do comprimento de onda, da data de imageamento e da trajetória da radiação. A atmosfera altera a radiância de pontos da imagem de uma maneira aparentemente contraditória, pois ela atua como refletor, quando adiciona radiância extra ao sinal que é detectado pelo sensor, ou como absorvedor, quando atenua a quantidade de energia que incide sobre o alvo na superfície (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Os efeitos atmosféricos devem ser corrigidos, segundo Novo (2010), em três situações: quando o usuário precisa conhecer a reflectância, emitância ou retroespalhamento dos objetos; quando é necessário utilizar algoritmos que sejam baseados em operações aritméticas entre bandas; e quando o usuário deseja fazer uma análise temporal entre imagens, caracterizando as propriedades dos objetos presentes na cena. Nos dados de radar a capacidade de penetração aumenta com os comprimentos de onda longos (ARONOFF & PETRIE, 2005). Portanto, os dados de micro-ondas podem ser afetados por condições meteorológicas no momento da aquisição (NOVO & COSTA, 2008), pois o conteúdo de umidade influencia na constante dielétrica dos materiais, e consequentemente na quantidade de energia retroespalhada. Porém, a constante dielétrica afeta a quantidade de energia retroespalhada somente nas bandas com menores comprimentos de onda, que são as que tem menor capacidade de penetrar a radiação, por exemplo a banda X, e este estudo trata de imagens na banda C.

Já os erros geométricos de uma imagem provem do movimento de rotação da terra durante o processo de aquisição da imagem, velocidade de “varredura” finita, amplo campo de visada de alguns sensores, curvatura da terra, variações na posição da plataforma de aquisição e efeitos panorâmicos relacionados à geometria da imagem (NOVO, 2010). A correção dessas distorções é realizada em duas etapas distintas. Na primeira etapa, são eliminadas as distorções provenientes do momento da aquisição dos dados, o que exige uma série de informações de exatidão da plataforma. Geralmente, o usuário não tem acesso a esse tipo de informações, sendo essa correção realizada nos laboratórios de produção de imagens. Já a segunda etapa fica sob responsabilidade do usuário, a qual é necessária pra corrigir as distorções geradas pela visada cônica dos sensores. É necessário inserir na imagem uma projeção para se estabelecer um referencial de coordenadas que localize os alvos geograficamente, ou seja, é necessário realizar o processo de georreferenciamento da imagem (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Devido às diferenças na geometria do imageamento de radar, citadas no item 2.2.2, é necessário converter as geometrias de alcance inclinado para alcance no terreno. A conversão também pode ser realizada utilizando-se os dados de aquisição da imagem, bem como um modelo digital de elevação, para projetá-las planimétricamente.

2.2.6. Classificação de Imagens

A palavra classificar no dicionário é definida como "distribuir(-se) em classes e nos grupos respectivos, de acordo com um método ou sistema de classificação." (MICHAELIS, 2013). Ao tratar de classificação de imagens, o termo classificar não foge ao seu significado literal. Sendo assim, a classificação de imagens é definida como um processo que visa atribuir significado a um *pixel* em função de suas propriedades numéricas. As técnicas desse processo atribuem a cada *pixel* um rótulo em função de suas propriedades espectrais e/ou espaciais (NOVO, 2010).

A análise computacional dos dados de imagens de sensoriamento remoto é uma análise quantitativa, devido a sua capacidade de identificar e computar *pixels* para estimativas de cálculos de áreas. Este processo também é conhecido como classificação, que é um método através do qual grupos de feições podem ser associados à *pixels* de acordo com o seu caráter espectral. Este processo é implementado por meio computacional, e é necessário um treinamento anterior ou um bom conhecimento da área, para que seja possível reconhecer as semelhanças espectrais (RICHARDS e JIA, 2005).

Aronoff & Petrie (2005) definem que na classificação em sensoriamento remoto, os limites e em alguns casos até mesmo as classes de informações são desconhecidas, e devem ser geradas primeiramente a partir dos dados da imagem. O dado a ser classificado representa um fenômeno, mais comumente uma refletância espectral de um objeto, ou coeficiente de retroespalhamento em imagens SAR, representados na forma de uma imagem.

Uma definição mais simplificada é a de que o processo de classificação de uma imagem nada mais é do que identificar elementos que estão presentes na imagem por meio da associação de cada um de seus *pixels* a uma determinada classe pré-estabelecida (FITZ, 2008). Se um *pixel* satisfaz um determinado número de critérios, normalmente avaliado por meio de métodos estatísticos, esse *pixel* será atribuído à classe que mais se identifica aos critérios estabelecidos (MENESES e ALMEIDA, 2012).

3. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho propõe uma análise temporal de dados ERS-1 SAR, ERS-2 SAR e ENVISAT ASAR por meio de um modelo baseado em regras de decisão para classificação de áreas úmidas nas imagens. Na etapa de pré-processamento, utilizou-se um Modelo Digital de Elevação (MDE) ASTER GDEM para ortorretificar as imagens e também uma imagem ENVISAT ASAR serviu como referência na etapa de co-registro das demais imagens.

Para desenvolver o modelo de classificação, foi definido um limiar de valores de retroespalhamento, baseado em análises de uma imagem ERS-2 SAR e com o auxílio de uma imagem Landsat TM da mesma época. Além disso, houve a necessidade de utilizar uma imagem ENVISAT ASAR, que serviu para realizar a operação aritmética de razão entre imagens, juntamente com a imagem ERS-2 SAR utilizada para definir o limiar. As imagens que serviram para a operação de razão foram calibradas em valores lineares de retroespalhamento, diferente das demais imagens que possuem valores em decibéis.

Para determinar o limite das áreas a serem classificadas, foi necessário o uso de uma máscara compreendendo somente a área de estudo, a planície de inundação do Canal São Gonçalo.

Para confrontar os dados, foi gerado um modelo de classificação de áreas inundadas, que ocorrem comumente nos meses de inverno na várzea do Canal São Gonçalo. Os princípios para desenvolver esse segundo modelo foram semelhantes aos do primeiro modelo, porém houve a mudança na imagem ERS-2 SAR, que possui outra data de aquisição. Os demais dados foram os mesmos.

Neste capítulo serão descritos todos os dados, *softwares* e métodos utilizados no trabalho.

3.1.Dados e Aquisição

As imagens SAR utilizadas neste trabalho foram adquiridas por meio do projeto intitulado: *A combined approach based on remote sensing and numerical modeling techniques to assess wave energy potential (ESA Category 1 proposal Nr. 6537)*, aprovado pela Agência Espacial Européia. A imagem Landsat TM, o modelo digital de elevação global

(GDEM) elaborado com dados do sensor ASTER e os dados meteorológicos, foram adquiridos via *download* pela internet.

3.1.1. Dados ERS-1 e 2 SAR e Envisat ASAR.

Os satélites ERS-1 e ERS-2 foram lançados pela Agência Espacial Europeia (ESA, sigla em inglês) em 1991 e 1995, respectivamente. Ambos, com características idênticas, possuem um SAR banda C (5,6cm), antena de 10 x 1 m e polarização VV. Com ângulo de incidência de 23°, resolução de range de 26 m e de azimute de 30 m, processamento de 6 *looks*, faixa de recobrimento com 100 km de largura e órbita a aproximadamente 785 km acima da superfície da terra. Os satélites ERS-1 e ERS-2 operaram, também, conjuntamente, o que permitiu a obtenção de pares de imagens para a realização de pesquisas de interferometria SAR (JENSEN, 2011).

Em 2002, a ESA lançou o programa ENVISAT para substituir o programa ERS, representando um avanço em relação a ele. O satélite ENVISAT possui vários sensores abordo, dentre os quais estão dois sistemas de imageamento na região óptica e de micro-ondas (NOVO, 2010). O radar avançado de Abertura Sintética (*Advanced Synthetic Radar – ASAR*) que está a bordo desse satélite dá continuidade à missão dos radares de abertura sintética denominados *Active Microwave Instrument (AMI)*, utilizados pelos satélites ERS-1 e ERS-2. Esse sensor possui uma antena ativa, com ângulos de incidência de 15 e 45°. Na tabela 3.1 é possível analisar as características mais relevantes dos radares de abertura sintética ERS-1, ERS-2 e ENVISAT.

Tabela 3.1: Principais características dos sensores ERS-1 SAR, ERS-2 SAR e Envisat ASAR.

Radar de Abertura Sintética (SAR)	Ano de lançamento	Origem	Comprimento de onda (cm)	Ângulo de depressão, do *near* ao *far-range* (ângulo de incidência)	Polarização	Resolução em azimute (m)	Resoluçãoem range (m)	Largura da faixa, km	Altitude	Cobertura
ERS-1	1991	ESA	C-(5,6)	23°	VV	30	26	100	785	Órbita Polar
ERS-2	1995	ESA	C-(5,6)	23°	VV	30	26	100	785	Órbita Polar
Envisat (ASAR)	2002	ESA	C-(5,6)	15°-45°	VV, HH, VV/VH, HV/HH, VH/VV	30 - 1000	30 - 1000	5-150	786	Órbita Polar 98°

Adaptado de: Jensen (2011).

As imagens ERS-1 SAR, ERS-2 SAR foram adquiridas no modo *Precision Image*, e as imagens ENVISAT ASAR no *Image Mode*. Todas com polarização VV e com 12,5 m de resolução espacial. A aquisição das imagens foi em diferentes datas, como mostra a tabela 3.2, o que possibilitou a análise temporal realizada nesse trabalho.

Tabela 3.2: Data de aquisição das imagens e satélite.

Data de Aquisição	Satélite
05/06/1992	ERS-1
27/08/1995	ERS-1
28/04/1996	ERS-1
05/10/1997	ERS-1
24/01/2000	ERS-2
03/04/2000	ERS-2
08/05/2000	ERS-2
12/06/2000	ERS-2
21/08/2000	ERS-2
25/09/2000	ERS-2
30/10/2000	ERS-2
08/01/2001	ERS-2
26/08/2002	ERS-2
11/08/2003	ERS-2
04/10/2004	ENVISAT
04/09/2006	ENVISAT
22/01/2007	ENVISAT
26/02/2007	ENVISAT
07/05/2007	ENVISAT

3.1.2. Dados Landsat TM

A imagem óptica utilizada nesse trabalho é do sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite Landsat 5, que foi lançado em 1984. O TM é um sensor óptico mecânico que registra energia nas regiões do visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho termal do espectro eletromagnético. As bandas 1 a 5 e 7 do sensor têm resolução espacial de 30 x 30 m. Já a banda 6 do infravermelho termal tem resolução espacial de 120 x 120 m. A resolução temporal é de 16 dias, a altitude que o satélite se encontra é de 705 km, a faixa de imageamento de uma cena representa 185 x 185 km no solo e a inclinação orbital é de 98,2° (JENSEN, 2011).

A imagem Landsat serviu apenas para apoio visual na definição do limiar de valores de retroespalhamento. A escolha da imagem Landsat foi devido à grande disponibilidade de aquisição das imagens, o que tornou possível encontrar uma imagem de data próxima a da imagem SAR que serviu para definir o limiar de valores de retroespalhamento das áreas úmidas. Outro fator significante foi a boa qualidade dos dados disponíveis, o que proporcionou coerência na análise visual das imagens.

A imagem Landsat TM que serviu no apoio visual deste trabalho foi adquirida gratuitamente via internet, no *site* do *United States Geological Survey* (USGS, http://earthexplorer.usgs.gov).

3.1.3. Modelo Digital de Elevação ASTER GDEM

O ASTER GDEM é um modelo digital de elevação global, elaborado através de pares estereoscópicos de imagens do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), um projeto de parceria entre a *United States National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e o *Ministry of Economy, Trade and Industry* (METI) do Japão. O MDE ASTER GDEM está em sua versão 2, lançada em outubro de 2011. Sua cobertura vai de 83° de latitude Norte até 83° de latitude Sul. A resolução espacial é de 1 arco-segundo, com aproximadamente 30 m no Equador, e é referenciada para *World Geodetic System* 1984 (WGS84). A precisão vertical global do modelo é de 20 m com nível de confiança de 95% (ASTER GDEM, 2011).

A segunda versão dos dados ASTER GDEM está disponível para download no site http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/. A solicitação foi efetuada através das coordenadas geográficas 2D, e o download foi gratuito via Protocolo de Transferência de Arquivos (FTP).

3.1.4. Dados Meteorológicos

Devido a considerável influência que os fatores meteorológicos exercem na presença de áreas úmidas e/ou áreas inundadas, foram analisados nesse trabalho dados de precipitação, fenômenos El Niño e La Niña, direção e velocidade do vento. Essas informações estão disponíveis gratuitamente no Banco de Dados para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As variáveis atmosféricas estão disponíveis em dados

diários de 291 estações meteorológicas convencionais. Para este estudo, serão analisados os dados da estação número 83895, localizada no município de Pelotas – RS (Figura 3.1).

Além dos dados históricos do BDMEP, foram analisados dados do Climanálise Boletim do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). O Climanálise é um boletim de monitoramento e análise climática, que dispõe de dados climáticos, atmosféricos, escoamento, hidrológico, monitoramento de queimadas, monitoramento na Antártica, dentre outros.

Os dados do BDMEP estão disponíveis para download no endereço: http:// http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep. E os dados do Climanálise podem ser avaliados no endereço: http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/

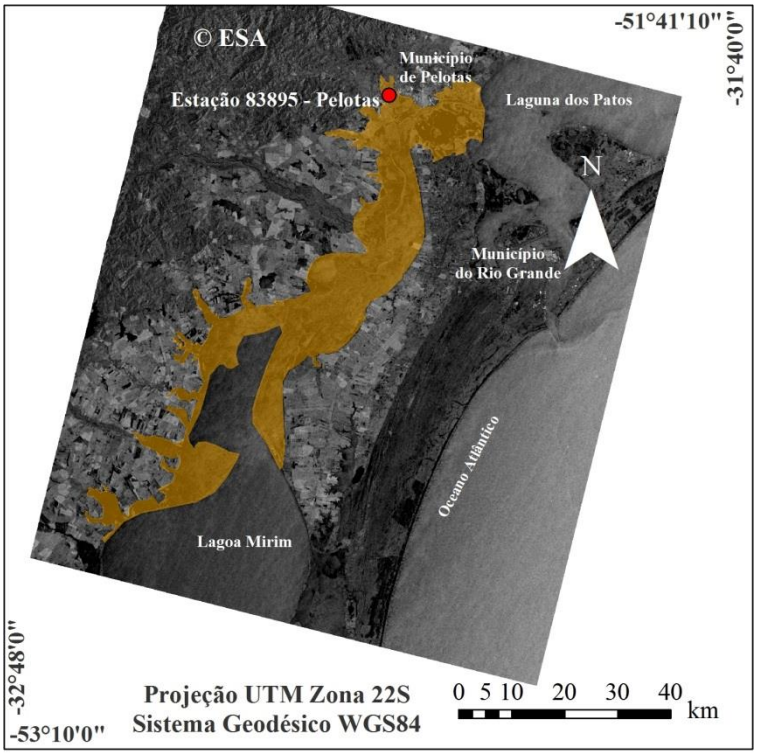

Figura 3.1: O ponto vermelho indica a localização da estação meteorológica de Pelotas, e a área amarela indica a área de estudo.

3.2. Softwares

Grande parte das etapas de pré-processamento das imagens foram realizadas no *NEXT ESA SAR TOOLBOX* (NEST) versão 4B. O NEST foi desenvolvido pela Agência Espacial Européia (ESA) e é um *software* de código aberto usado na leitura, pré-processamento, análise e visualização de um amplo número de arquivos SAR, como: ENVISAT, ERS-1 e 2, JERS SAR, ALOS PALSAR, TerraSAR-X, Radarsat-1 e 2 e Cosmo-SkyMed (http://nest.array.ca/web/nest/nest-home).

As etapas de co-registro, desenvolvimento do modelo e a posterior classificação das imagens foram realizadas no ERDAS IMAGINE™, que foi desenvolvido pela companhia ERDAS e é um *software* que realiza análises avançadas de sensoriamento remoto e modelagem espacial (http://www.intergraph.com). Esse sistema incorpora funções de processamento de imagens e Sistemas de Informações Geográficas (SIG), incluindo importação, visualização, alteração e análise de dados raster e vetoriais.

Já a edição de mapas e a análise da frequência das áreas úmidas e inundadas na área de estudo foram alcançadas por meio do *software* ArcGIS ™ versão 10. O ArcGIS consiste em uma plataforma para criar e gerenciar soluções por meio da aplicação do conhecimento geográfico (http://www.esri.com/software/arcgis).

A figura 3.2 ilustra os *softwares* utilizados em cada etapa.

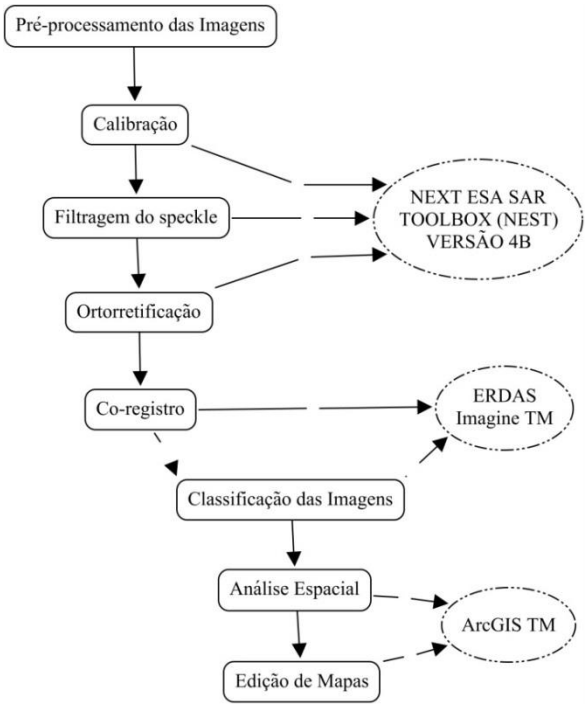

Figura 3.2: Etapas realizadas para classificação das imagens, indicando qual o software utilizado.

3.3.Processamento das imagens SAR

3.3.1. Pré-processamento

Para classificar as imagens SAR, foi preciso aplicar algumas etapas de pré-processamento que serão descritas a seguir.

3.3.1.1. Calibração

As imagens de satélite sem calibração podem ter uso somente para fins qualitativos, para o uso quantitativo dos dados é essencial que as imagens sejam calibradas. Nesta etapa, aplicou-se a correção da constante de calibração absoluta, ângulo de incidência, ganho da antena e perda ao longo do alcance (range).

3.3.1.2.Filtragem do Speckle

É possível reduzir o speckle por meio de processamento em porções da uma imagem e pela recombinação dessas porções de forma que a interferência seja minimizada (Kasischke *et al.*, 1984 apud Jensen, 2011).

Para reduzir o speckle, foram testados os filtros frost com janela móvel de 3X3, frost 5X5, mediana 5X5, mediana 7X7 e mediana 7X7 com média 7X7. O filtro de média com janela móvel de 7X7 sobre o filtro de mediana com janela móvel 7X7 mostrou-se o mais eficaz para delimitar as áreas úmidas nas imagens, pois apresentou menor coeficiente de variação, o que significa que é menor a influência do speckle no valor do pixel, e também obteve média normalizada mais próxima de 1, dentre os demais, o que significa maior manutenção das características radiométricas das imagens. De acordo com Dias (2002), que utiliza esse mesmo processo de filtragem do speckle para delimitar áreas úmidas em imagens de RADAR, o filtro de mediana 7X7 deixa a imagem mais homogênea. O autor ainda acrescenta que a aplicação do filtro de média com janela móvel 7X7 suaviza a imagem já filtrada com filtro de mediana 7X7.

3.3.1.3. Ortorretificação

Devido às variações topográficas do terreno coberto pela cena e da visada lateral dos sensores, as distâncias podem estar distorcidas nas imagens SAR. A ortorretificação converte as imagens do sensor para coordenadas do mapa e minimiza as distorções de altura, que são comuns em imagens de Radar (Arigony-Neto, 2006). Por meio dessa correção, a representação geométrica da imagem irá parecer o mais próximo possível do real (ESA, 2012). Nessa etapa, foram utilizados os metadados da imagem como parâmetros de correção, juntamente com dados de referência do ASTER GDEM2 para a precisa geolocalização. A projeção de saída das imagens foi UTM zona 22S, com o elipsoide de referência WGS84. O método de reamostragem para o MDE foi a interpolação bilinear, a qual tem a propriedade de suavizar as feições, e para os pixels das imagens foi o vizinho mais próximo, pois este preserva os valores de retroespalhamento.

3.3.1.4.Co-registro

Para realizar qualquer operação aritmética entre imagens adquiridas em datas diferentes, elas devem estar co-registradas (MENESES E SANTOS, 2012). Para isso, utiliza-se uma imagem de referência para o posicionamento das demais imagens. Neste trabalho, as imagens foram co-registradas através do módulo AutoSync do ERDAS IMAGINE 9.1, que realiza o co-registro das imagens por meio de um algoritmo com um ponto automático de correspondência, que gera milhares de pontos de amarração e produz um modelo matemático para vincular todas as imagens à imagem de referência (ERDAS, 2008).

A imagem de referência utilizada foi a Envisat ASAR de 07/05/2007, imagem mais atual dentre o conjunto de imagens. O processamento funcionaria caso outra imagem fosse utilizada como referência, porém, preferiu-se utilizar a mais atual, por acreditar que os dados do satélite estão mais atualizados. O modelo geométrico aplicado foi o polinomial, que é um modelo bidimensional que faz a transformação imagem a imagem usando a fórmula apresentada na figura 3.3. A ordem polinomial utilizada foi 4 e erro médio quadrático (*Root Mean Square – RMS*) de 0,5 pixel. O método de reamostragem das imagens foi o vizinho mais próximo.

$$X = \sum_i A_i x^i y^{(n-i)}$$
$$Y = \sum_i B_i x^i y^{(n-i)}$$

Figura 3.3: Fórmula utilizada no modelo polinomial.

Fonte: ERDAS, 2008.

Após o co-registro, as imagens ficaram precisas em termos de posicionamento, com exceção das imagens que foram calculadas para valores lineares na etapa de calibração, nas quais foi necessário realizar a reamostragem para valores de 32 bits float, para após co-registrá-las utilizando a mesma imagem (ENVISAT 07/05/2007) como referência.

Por fim, aplicadas todas as etapas de pré-processamento, as imagens estavam prontas para a classificação. Na figura 3.4 e 3.5 é possível visualizar todas as imagens pré-processadas em escala de decibéis e com a sobreposição de um polígono que delimita a área a ser classificada em cada imagem.

Figura 3.4: Imagens A, B, C , D e E – L foram adquiridas pelos sensores ERS-1 e ERS-2 SAR, respectivamente. Ao analisar as imagens é possível perceber diferenças nos tons de cinza, causadas pelas diferenças no retroespalhamento. Este fato se deve as diferentes datas de aquisição das imagens, já que a dinâmica do canal, bem como das áreas adjacentes, modifica no decorrer do ano.

Figura 3.5: Imagens M – N e O – S foram adquiridas pelos sensores ERS-2 SAR e ENVISAT ASAR, respectivamente. Ao analisar as imagens é possível perceber diferenças nos tons de cinza, causadas pelas diferenças no retroespalhamento. Este fato se deve as diferentes datas de aquisição das imagens, já que a dinâmica do canal, bem como das áreas adjacentes, modifica no decorrer do ano.

3.3.2. Criação do modelo e classificação das imagens

3.3.2.1. Classificação das áreas úmidas

Para desenvolver um algoritmo capaz de diferenciar as áreas úmidas dos demais alvos nas imagens SAR e ASAR, foram definidas três condições: (1) Valor de retroespalhamento > = -12,6 e < -7,4; (2) Imagem Razão > 0,29 e < 0,86; e (3) Máscara = 1 .

A primeira foi baseada em um limiar de valores de retroespalhamento, em decibéis, das áreas úmidas na imagem na qual foi identificada visualmente a maior extensão dessas áreas (*i.e.*, a imagem ERS-2 SAR de 25/09/2000). Por meio de análise visual e manipulação da paleta de cores da imagem, foi possível identificar o intervalo de valores de retroespalhamento que correspondem às áreas úmidas nessa imagem. Para apoiar na tomada de decisão quanto às áreas que correspondiam às áreas úmidas e as que não correspondiam, foi utilizada uma imagem Landsat TM de 27/09/2000, ou seja, adquirida dois dias após a imagem SAR usada na extração dos valores que definem o limiar. A imagem TM na composição chamada habitualmente de colorido verdadeiro RGB 321 serviu como apoio visual na análise, pois esse sensor opera na faixa do espectro visível, o que permite que a análise se torne mais segura devido ao estimulo que essa radiação produz ao olho humano. A facilidade de identificar feições nessa faixa do espectro eletromagnético permitiu avaliar se as áreas analisadas na imagem SAR realmente correspondiam à áreas úmidas. Para chegar a um limiar foram realizados vários testes e comparações. Foram selecionadas algumas amostras nas imagens e na paleta de cores modificava-se a cor, para poder comparar se era ou não uma área úmida. Ao final, foram selecionadas 55 amostras e pintadas de vermelho (Figura 3.3), quando verificou-se que estas correspondias às áreas úmidas, resultando em um total de 6.044.226 pixels selecionados. Portanto, os limites encontrados para o retroespalhamento nas áreas úmidas são de -12,6 e -7,4 dB.

Como pode ser visto na figura 3.5 quase a totalidade da planície de inundação foi abrangida como áreas úmidas, devido a certa diversidade de valores de retroespalhamento que estas áreas possuem, pois algumas estão com mais presença de água e menos vegetação e outras apresentam-se ao contrário, com mais vegetação do que água. Além disso, como o sinal do radar é bastante influenciado pela textura, em certos períodos o valor de retroespalhamento de algumas áreas pode modificar devido a fatores ambientais que geram mais sedimentos em

suspensão, ou até mesmo aumentos da vazão nos corpos lagunares o que pode gerar diferenças de rugosidade e afetar no sinal de retorno do radar.

Figura 3.6: Em vermelho as áreas correspondentes aos valores de retroespalhamento selecionados para o limiar de -12,6 e -7,4 dB.

Porém, se for utilizado somente esse intervalo para classificar as imagens, pode haver confusão em algumas áreas devido à presença de elementos com baixos valores de retroespalhamento que não correspondem as áreas de banhado. Um exemplo é a classificação das áreas de rizicultura que são áreas úmidas antrópicas e não representam o objetivo de mapeamento deste trabalho, que causariam confusão na classificação principalmente das imagens adquiridas nos meses de verão, que são os meses de maior ocorrência dessa cultura. Os corpos d'água, que também apresentam baixo valor de retroespalhamento, podem ser classificados como áreas úmidas, caso fosse utilizado no modelo somente o limiar em valores de retroespalhamento. Pois como visto na figura 3.5 Canal São Gonçalo, Lagoa Mirim, e outros corpos d'água que localizam-se na planície de inundação do canal, foram classificados como áreas úmidas.

Deste modo, para a identificação dos corpos d'água nas imagens SAR e ASAR, foi usada uma abordagem capaz de excluir essas feições da classificação. Isto foi possível por meio da operação aritmética de razão entre imagens. Para isso, foi necessário selecionar uma imagem com pouca ocorrência de áreas úmidas e com a menor influência possível de áreas de inundação, ou seja, as áreas com baixos valores de retroespalhamento nessa imagem

correspondem, em sua grande maioria, a corpos d'água permanentes. A imagem selecionada foi a ENVISAT ASAR de 04/10/2004. A imagem utilizada como a mais úmida, foi a mesma que serviu para definir o limiar da primeira etapa. Essas imagens serviram para calcular a razão entre a imagem mais úmida e a menos úmida, de forma a selecionar as áreas onde ocorreram mudanças na cobertura da terra. Conforme Centeno (2003), a razão entre imagens serve para evidenciar sutis variações espectrais, nesse caso variações de retroespalhamento, da cobertura do terreno que de outra maneira encontram-se mascaradas pela pequena variação dos níveis de cinza.

Para realizar a razão entre as imagens foi preciso convertê-las para valores lineares de retroespalhamento, pois segundo Mendes Júnior (2011), neste tipo de operação usa-se imagens SAR em escala sigma linear, pois diferente das imagens em decibéis, nestas não ocorrem valores iguais a zero, os quais resultariam em valores indeterminados na imagem razão. Além disso, o produto da razão foi uma imagem de ponto flutuante, a qual teve que ser convertida, posteriormente, para 32 bit ponto flutuante, pois só assim foi possível analisar os valores que representavam as áreas úmidas, devido a grande variação de valores que os dados 32 bit ponto flutuante apresentam.

Da operação razão entre as imagens de 25/09/2000 e 04/10/2004 resultou uma imagem sintética com valores de 0 até 1 (Figura 3.7), e como a operação de razão consiste na divisão dos valores de cada pixel, a imagem resultante apresentou como valores mais baixos as maiores diferenças. Sendo assim, os corpos d'água permanentes, por estarem presentes nas duas imagens, resultaram em valores mais altos, mais próximos de 1, na imagem razão. Já as áreas úmidas apresentaram os valores mais baixos. Sendo assim, afim de excluir os corpos d'água da classificação, foi definido, por meio do manuseio da paleta de cores da imagem razão e com o apoio visual da imagem de 25/09/2000, que o intervalo entre 0,3 e 0,85 corresponde às áreas úmidas.

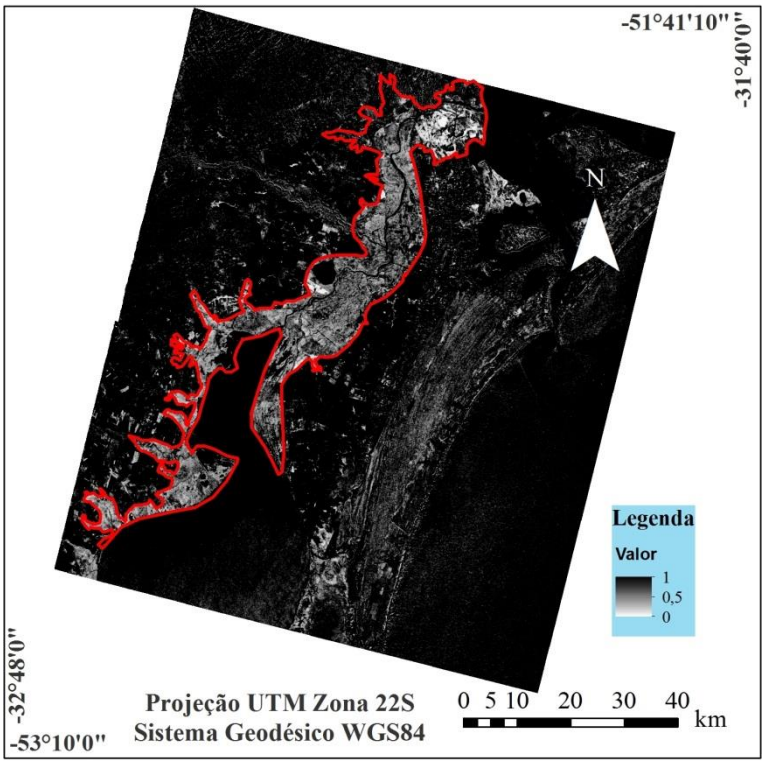

Figura 3.7: Resultado da razão entre as imagens de 25/09/2000 e 04/10/2004. As tonalidades mais claras representam os menores valores, ou seja, as áreas úmidas, enquanto as mais escuras correspondem aos valores mais altos.

A terceira condição está relacionada à máscara que delimitou as áreas a serem classificadas. Essa máscara foi definida por meio de análise visual da várzea do Canal São Gonçalo, que está bem representada na imagem ERS-2 SAR de 25/09/2000, definida como imagem com mais áreas úmidas nas etapas anteriores, e que serviu nessa etapa para a identificação da várzea do Canal São Gonçalo. Após a delimitação da várzea por meio de um vetor, esse foi transformado para raster e resultou em uma imagem de 1 bit, com valores de 0 e 1, sendo 1 correspondente à área a ser classificada. Na figura 3.8 é possível observar a máscara resultante do procedimento descrito no parágrafo.

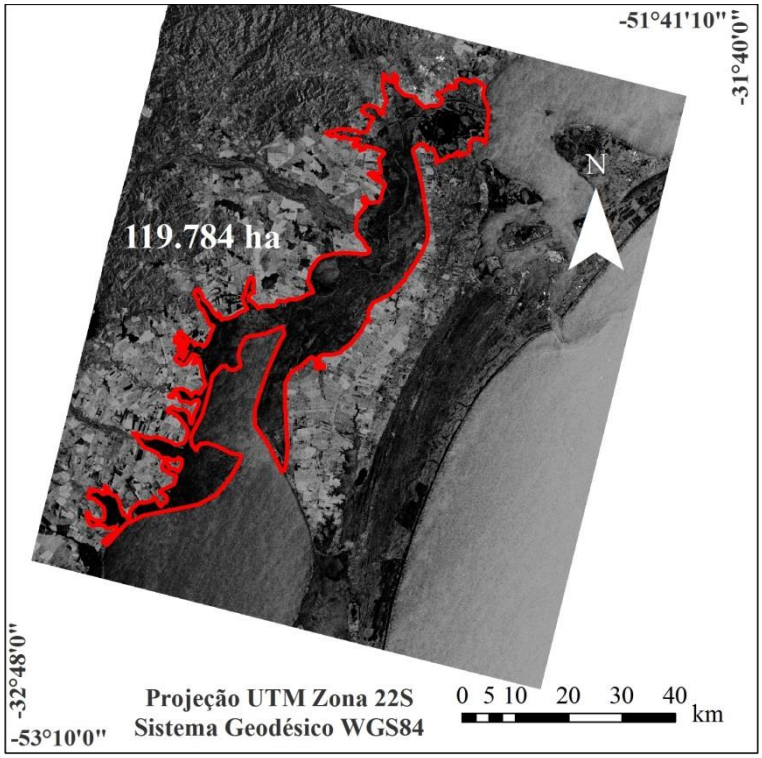

Figura 3.8: Máscara utilizada para delimitar as áreas a serem classificadas. O valor em hectares indica a área total da máscara.

Após a definição das três condições, essas foram implementadas na Linguagem de Modelagem Espacial (*Spatial Modeler Language* – SML) do ERDAS Imagine. Portanto, para satisfazer a condição de área úmida, cada pixel da imagem deve atender simultaneamente às três condições, como mostra a Figura 3.9.

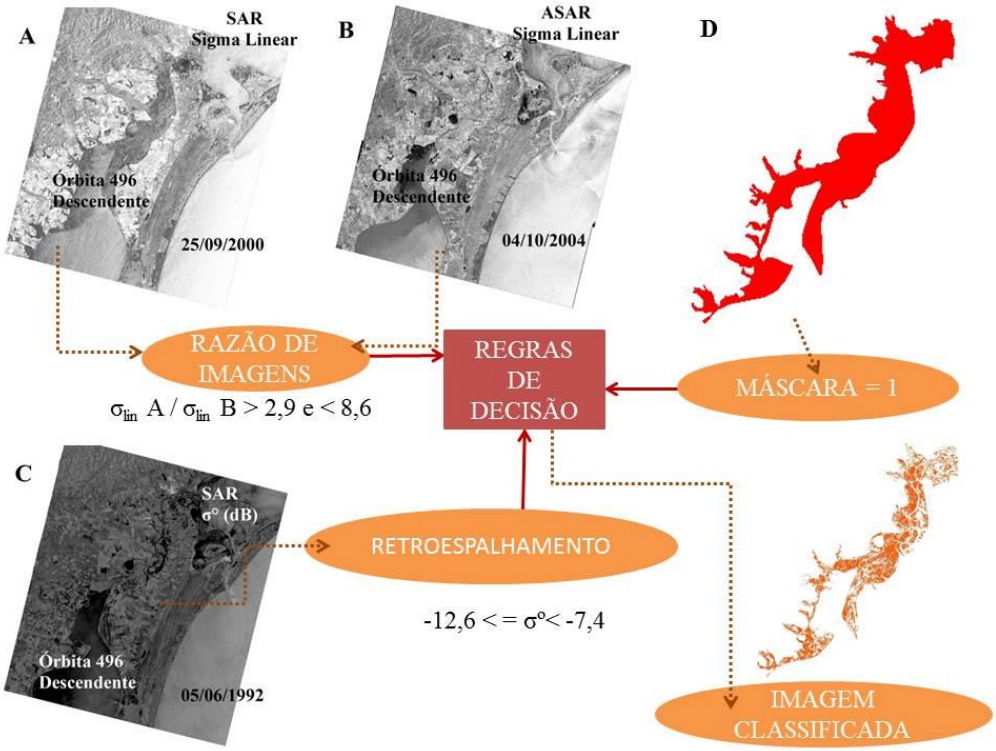

Figura 3.9: Representação do algoritmo usado para classificar as áreas úmidas. O exemplo mostra a classificação da imagem obtida em 05/06/1992 (C), com as três condições utilizadas, bem como a imagem classificada.

3.3.2.2.Classificação das áreas de inundação

As inundações na planície aluvial do Canal São Gonçalo ocorrem com frequência nos meses de inverno. Os fatores que mais influenciam nesse fenômeno são a baixa declividade do canal, a atuação dos ventos, o nível de água da Lagoa dos Patos e Mirim, bem como as precipitações da época (Hartmann *et al*., 1986).

Sendo assim, e devido a observação de que algumas imagens, principalmente as adquiridas nos meses de inverno, apresentam baixos valores de retroespalhamento na planície de inundação do canal, viu-se a necessidade de gerar um modelo capaz de identificar as áreas inundadas na planície do canal, para que os resultados dessa classificação corroborem com os da classificação anterior, pois assim é possível identificar que quando ocorrem pequenas extensões de áreas úmidas, pode ser que estas áreas estejam ocupadas por inundações.

Para desenvolver um modelo apropriado para classificar as áreas inundadas da planície do Canal São Gonçalo, também foram necessárias três condições, bastante semelhantes às da etapa anterior. Porém, nessa situação foi definido um limiar de valores de retroespalhamento em decibéis das áreas inundadas, analisando-se visualmente a imagem com a maior extensão

de áreas inundadas (*i.e.*, a imagem ERS-2 de 26/08/2002). Como estas áreas apresentam baixos valores de retroespalhamento, e considerando que as áreas úmidas são áreas que na maioria das vezes antecedem as áreas de inundação, considerou-se que o valor mais baixo de retroespalhamento do limiar da classificação anterior (-12,6) seria o limite entre áreas úmidas e áreas inundadas. Portanto, a primeira condição para que uma área seja considerada como inundada é apresentar valores de retroespalhamento menores que -12,6.

A segunda condição também foi uma imagem razão, porém, resultado da razão entre a imagem com maior extensão de áreas inundadas (*i.e.*, a imagem ERS-2 de 26/08/2002) reamostrada para valores lineares de retroespalhamento e como denominador a mesma imagem utilizada na razão do modelo anterior (*i.e.*, a imagem ENVISAT de 04/10/2004). A escolha da mesma imagem deu-se pelo fato, como já descrito anteriormente, da imagem apresentar menor número de áreas que comprometam o resultado da classificação, já que é uma imagem que apresenta poucas áreas úmidas e quase nenhuma área inundada, e os corpos d'água que estão presentes na imagem são, em grande maioria, permanentes ao longo do tempo. Deste modo, a imagem serviu , mais uma vez, como uma máscara de corpos d'água na classificação, pois os mesmos, por estarem presentes nas duas imagens resultaram em valores mais próximos de 1 e os valores mais baixos ficaram relacionados às áreas inundadas. Da imagem resultante da operação aritmética de razão (Figura 3.10) definiu-se que as áreas inundadas são as que possuem valores menores que 0,21.

A terceira condição foi idêntica à etapa anterior, sendo utilizada a mesma máscara (Figura 3.8) para delimitar as áreas a serem classificadas. A Figura 3.11, ilustra os processos realizados para a classificação das áreas inundadas.

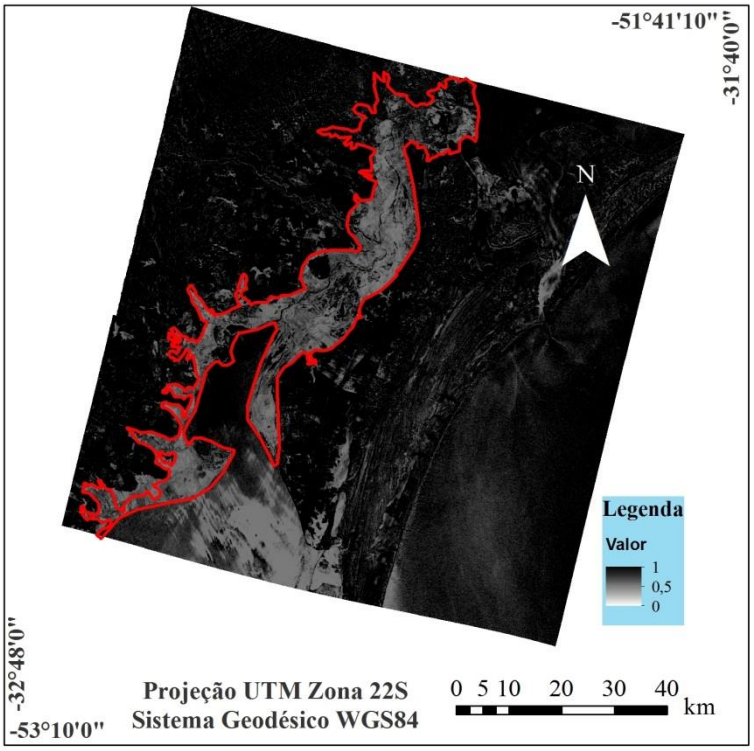

Figura 3.10: Resultado da razão entre as imagens de 26/08/2002 e 04/10/2004. As tonalidades mais claras representam os menores valores, ou seja, as áreas inundadas, enquanto as mais escuras correspondem aos valores mais altos de retroespalhamento.

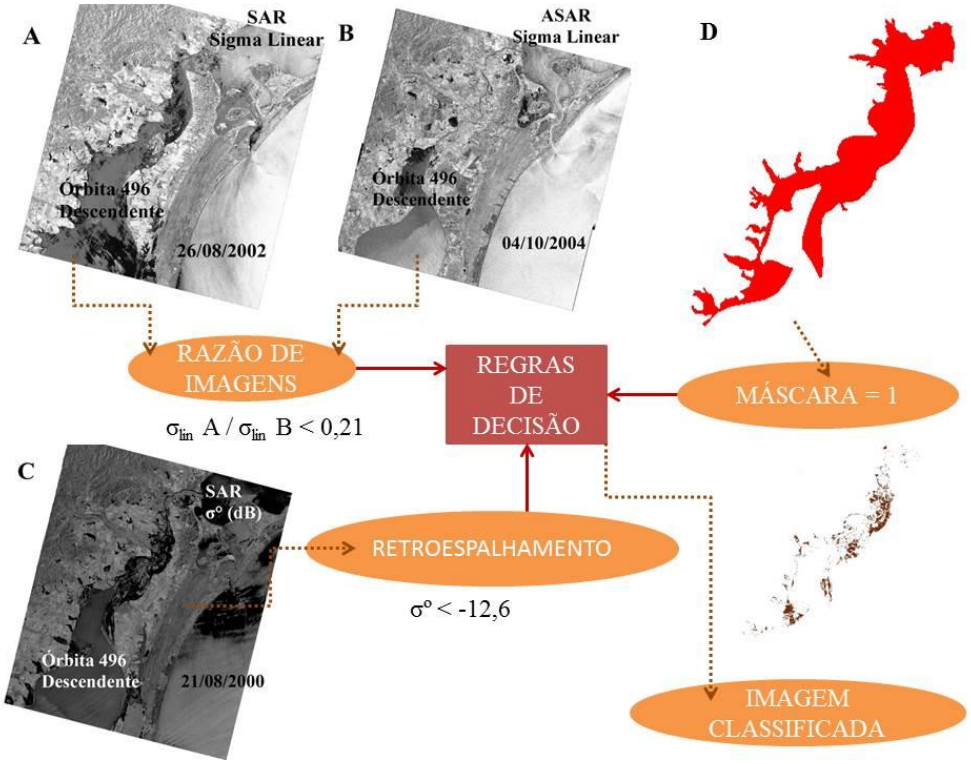

Figura 3.11: Representação do algoritmo usado para classificar as áreas inundadas. O exemplo mostra a classificação da imagem obtida em 21/08/2000 (C), com as três condições utilizadas, bem como a imagem classificada.

3.4. Análise da frequência da ocorrência das áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo.

Com o intuito de analisar os locais de maior ocorrência de áreas úmidas e/ou inundadas na planície de inundação do Canal São Gonçalo, foram feitas análises de frequência. O produto foi uma classificação pixel a pixel com resultados de 0 a 19, ou seja, o número de imagens analisadas.

Foram realizadas análises de todas as imagens e posteriormente essas foram agrupadas em dois períodos: quente e frio, para tornar possível a análise sazonal dos dados. Além disso, os dados de frequência de áreas úmidas e inundadas foram combinados em uma só imagem, afim de analisar qual a área mais frequente pixel a pixel.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Variação na extensão das Áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo

Na planície de inundação do Canal São Gonçalo ocorre uma vegetação pioneira de influência fluvial, com predomínio de herbáceas adaptadas aos solos mal drenados com condições de intensa umidade, de ocorrência comum em áreas planas e frequentemente inundadas, o que vem a favorecer a formação de banhados (RADAMBRASIL, 1986). Considerando-se as características citadas e que a área de estudo localiza-se exatamente na planície de inundação, é aceitável que a distribuição espacial das áreas úmidas ao longo da área de estudo apresente-se bastante uniforme, na maioria das datas, de acordo com os dados da classificação apresentados na figura 4.1. Porém, quantitativamente as áreas apresentaram significativa diferença ao longo da análise temporal. No geral, a imagem de 25/09/2000 (Figura 4.1 J) foi a que apresentou maior extensão de áreas úmidas, 63.742,20 ha. No outro extremo está a imagem de 26/08/2002 (Figura 4.1 M), onde foram classificados apenas 25.247,40 ha de áreas úmidas. Na figura 4.1 é possível observar a variação na extensão das áreas úmidas durante o período de estudo.

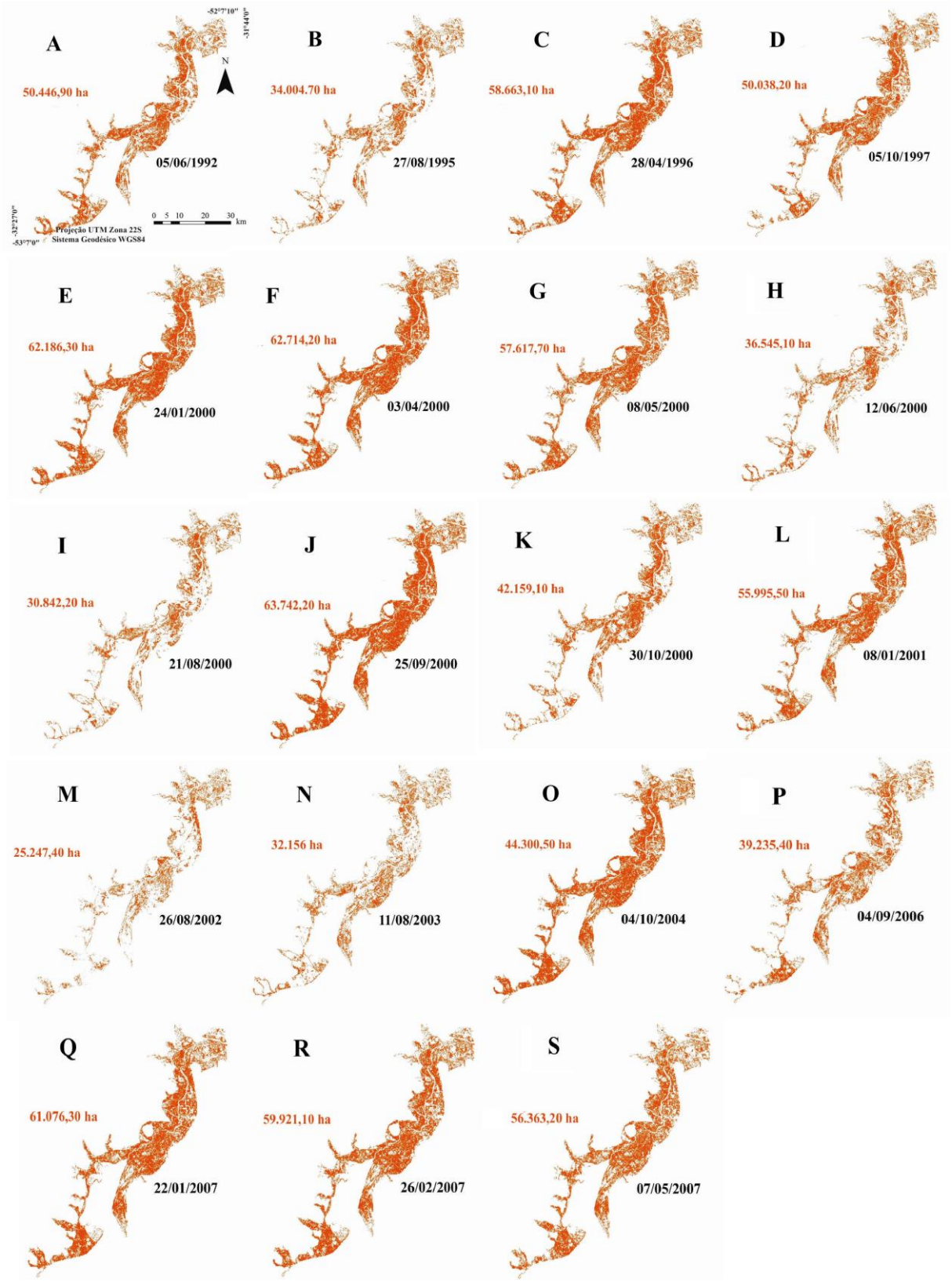

Figura 4.1: Variação na extensão das áreas úmidas do Canal São Gonçalo durante o período 1992-2007.

De maneira geral, as terras úmidas são planas, de baixo relevo, cuja localização ou condições de precipitação e drenagem fazem delas zonas alagadiças, sujeitas a ações sazonais de áreas inundadas com pouca profundidade (TASSI, 2008). Sendo assim, viu-se a necessidade de classificar as áreas inundadas ao longo da planície do canal. Os resultados da classificação de áreas inundadas apontaram para uma maior ocorrência de inundações nos meses de inverno (Figura 4.2). Na figura 4.2 é possível analisar as extensões mais significativas das áreas inundadas durante o período de estudo. Nas demais imagens foram identificadas apenas pequenas áreas inundadas (Tabela 4.1), não representáveis na escala da figura 4.2.

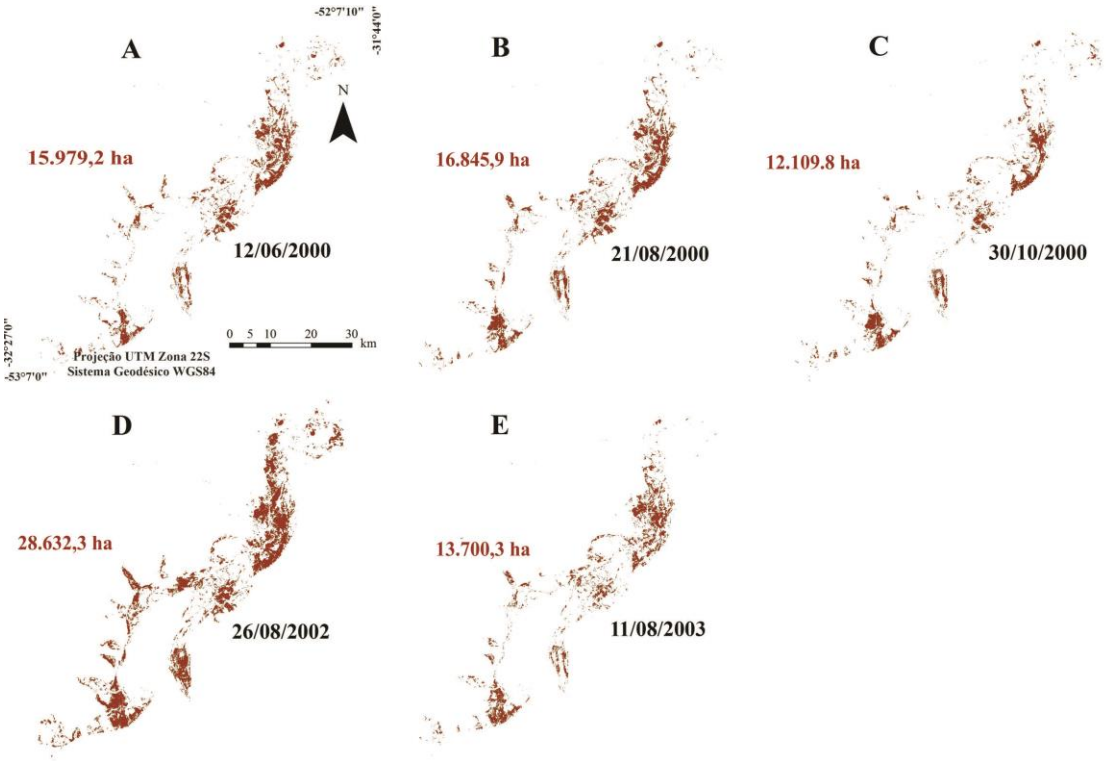

Figura 4.2: Variação espacial das áreas inundadas na planície do Canal São Gonçalo. As estimativas resultantes das demais imagens da série temporal não foram representadas devido à pouca representatividade espacial.

Com os dados resultantes da classificação de áreas úmidas e áreas inundadas (Tabela 4.1), é possível confirmar que há uma variação na extensão de ambas ao longo dos diferentes meses do ano, assinalando uma sazonalidade mensal. Por outro lado, ao analisar os dados por ano, percebe-se que não há acréscimo nem decréscimo significativo entre os anos, portanto não apresenta correlação entre a variável “ano”.

Todos os meses de agosto analisados exibem menores índices de áreas úmidas, seguidos dos meses de setembro e outubro, enquanto os primeiros meses do ano foram os que apresentaram os maiores valores. Já as áreas inundadas, mostram-se bastante densas nos meses em que há pouca presença de áreas úmidas, merecendo destaque o mês de agosto. A figura 4.3 apresenta o somatório do quantitativo de áreas úmidas e áreas inundadas por mês, onde é possível analisar que o pico de ocorrência de áreas inundadas é exatamente quando há um decréscimo de áreas úmidas. Já na tabela 4.1 é possível observar os valores de áreas úmidas e inundadas representadas na ordem cronológica das imagens.

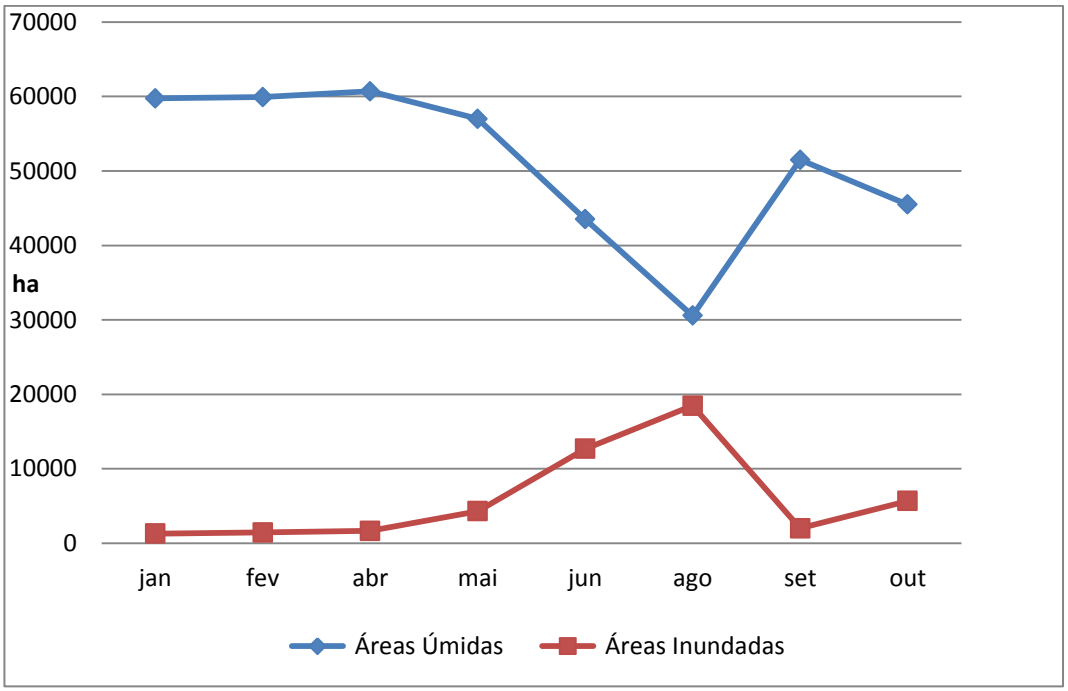

Figura 4.3: Somatório do quantitativo de áreas úmidas e inundadas por mês.

Tabela 4.1: Áreas úmidas e inundadas classificadas em cada uma das imagens.

Data de Aquisição	Áreas Úmidas (ha)	Área Inundadas (ha)	Corpos d'água*	Outros**
05/06/1992	50.466,90	9.376,82	17.859,00	42.081,28
27/08/1995	34.004,70	14.656,20	17.859,00	53.264,10
28/04/1996	58.663,10	2.251,93	17.859,00	41.009,97
29/04/1996	58.314,60	2.067,38	17.859,00	41.543,02
05/10/1997	50.038,20	4.541,18	17.859,00	47.345,62
06/10/1997	47.506,50	3.668,20	17.859,00	50.750,30
24/01/2000	62.186,30	2.542,23	17.859,00	37.196,47
03/04/2000	62.714,20	1.036,80	17.859,00	38.174,00
08/05/2000	57.617,70	4.252,95	17.859,00	40.054,35
12/06/2000	36.545,10	15.979,20	17.859,00	49.400,70
21/08/2000	30.842,20	16.845,90	17.859,00	54.236,90
25/09/2000	63.742,20	3.151,87	17.859,00	35.030,93
30/10/2000	42.159,10	12.109,80	17.859,00	47.656,10
08/01/2001	55.995,50	543,28	17.859,00	45.386,22
26/08/2002	25.247,40	28.632,30	17.859,00	48.045,30
11/08/2003	32.156,00	13.700,30	17.859,00	56.068,70
04/10/2004	44.300,50	354,59	17.859,00	57.269,91
04/09/2006	39.235,40	843,96	17.859,00	61.845,65
22/01/2007	61.076,30	756,86	17.859,00	40.091,84
26/02/2007	59.921,10	1.447,37	17.859,00	40.556,53
07/05/2007	56.363,20	4.342,12	17.859,00	41.219,68

*O valor de corpos d´água representa as áreas que não foram classificadas como úmidas em todas as análises, sendo consideradas como os corpos d'água permanentes.

**Outros correspondem às áreas que não foram classificadas nem como úmidas, nem como inundadas e não são corpos d'água permanentes.

De acordo com Seeliger *et al.* (1998), no sistema lagunar Patos-Mirim, no qual está inserido o Canal São Gonçalo, uma elevada precipitação pluviométrica e um complexo padrão de fluxos dos rios na bacia de drenagem, resultam em processos de drenagem altamente variáveis e dinâmicos.

Os resultados da classificação apontam para variação das áreas úmidas ao longo dos meses, intercalando com alguns períodos de inundações principalmente nos meses de agosto, que são meses típicos de alta precipitação pluviométrica devido ao inverno chuvoso característico da região. Deste modo, é possível associar os resultados com as variações no processo de drenagem citados no parágrafo anterior. Além disso, as dinâmicas no processo de drenagem da área também podem estar interligadas com a diferença na quantificação de áreas úmidas ao longo da análise temporal, como observado na tabela 4.1. Um exemplo é o ano de 2000, que abrange o maior número de imagens, as áreas úmidas chegam a variar de 30.842,20 ha em 21/08/2000 para 63.742,20 ha em 25/09/2000, apresentando uma variação de 32.900 ha

no período de apenas 35 dias. É possível ainda relacionar a variação de áreas inundadas no mesmo período, que passou de 16.845,90 ha em 21/08/2000 para 3.151,87 ha 25/09/2000. Já em 30/10 do mesmo ano, 35 dias após o maior índice de áreas úmidas, essas passaram a ocupar 42.159,10 ha dando um espaço para 12.109,80 ha de áreas inundadas.

Para o ano de 2007, onde há a disponibilidade de três meses para análise (janeiro, fevereiro e maio), todos no primeiro semestre do ano, não se observam grandes variações de áreas úmidas. Estas ficam na ordem de 61.076,30 ha em janeiro, 59.921,10 ha em fevereiro e 56.363,20 ha em maio. Os dados de inundação também se mantiveram sem grandes variações, porém apresentam-se inversamente proporcionais às áreas úmidas, com 756,86 ha para janeiro, 1.447,37 ha para fevereiro e 4.342,12 ha para maio. Assim, é possível perceber a maior estabilidade de quantidade de áreas úmidas nos primeiros meses do ano, onde as variações são pouco significativas e que ao se aproximar dos meses de inverno, como o mês de maio, as áreas úmidas começam a dar espaço às áreas inundadas.

4.2. Análise espacial da ocorrência de áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo

Para facilitar a compreensão da variação espacial da ocorrência de áreas úmidas e inundadas na planície de inundação do Canal São Gonçalo, foram calculados para cada pixel as frequências das áreas úmidas, das áreas inundadas e ainda estas foram divididas em período mais quente e período mais frio.

4.2.1. Análise da frequência da ocorrência de áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo

As áreas úmidas em geral têm uma ocorrência em grande parte da planície de inundação do canal. As maiores concentrações localizam-se próximas às margens do canal em praticamente toda sua extensão. As maiores concentrações estão próximas aos principais corpos d’água localizados na planície: entorno da Lagoa Formosa na margem noroeste e sudeste do canal, foz do Rio Piratini e Lagoa Fragata (Figura 4.4).

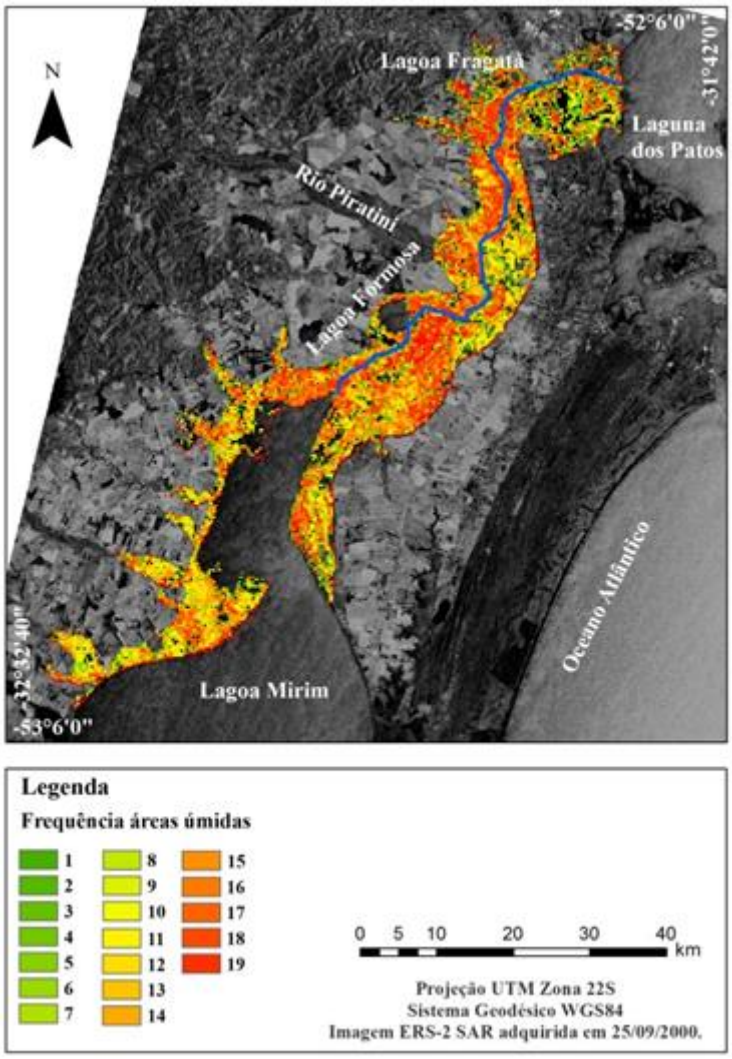

Figura 4.4: Variação espacial das áreas inundadas na planície do Canal São Gonçalo. As estimativas resultantes das demais imagens da série temporal não foram representadas devido à pouca representatividade espacial.

Já as áreas inundadas tem ocorrência menos distribuída na área de estudo. As maiores concentrações dessas áreas estão na margem sudeste e noroeste nas proximidades da foz do Rio Piratini, seguindo pela margem noroeste até a Lagoa Fragata (Figura 4.5). Também é possível perceber a concentração de frequência dessas áreas em poucas imagens ao longo da série temporal. Este fator pode ser explicado pela maior ocorrência de inundações nos meses de inverno.

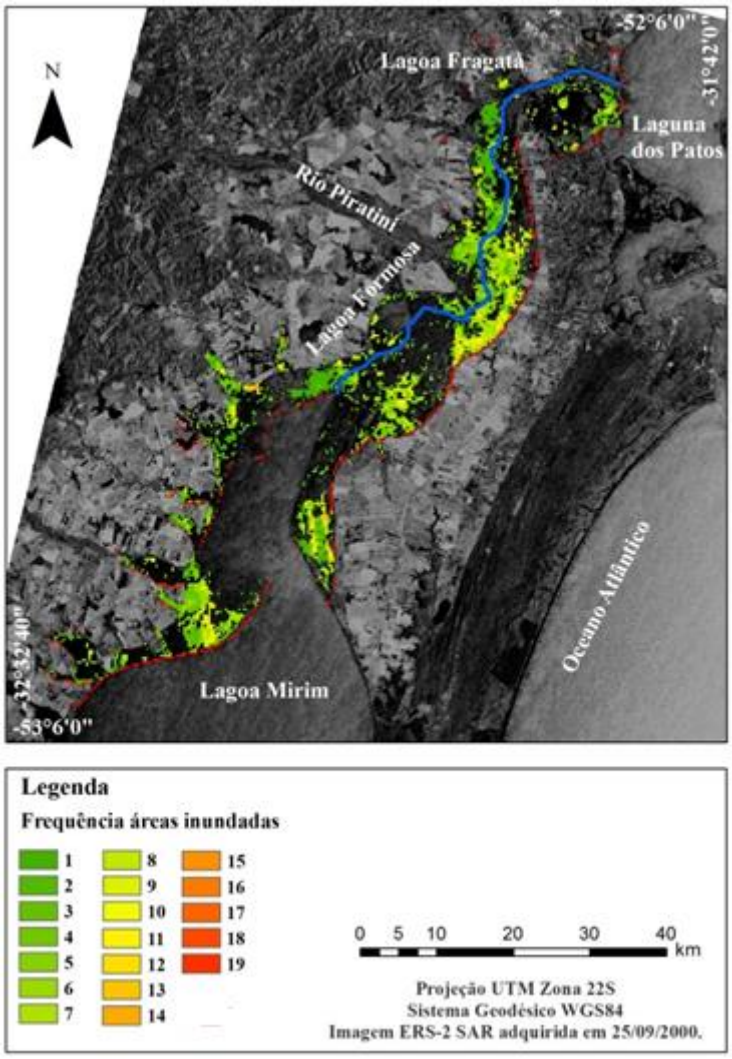

Figura 4.5: Frequência das áreas inundadas ao longo da série temporal.

4.2.2. Análise sazonal da ocorrência de áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo

Como é notável a concentração, principalmente das áreas inundadas, em certas épocas do ano, tornou-se necessário dividir a análise em dois períodos do ano: período quente e período frio. Cavalcanti *et al.* (2009), definem que de outubro até abril ocorre o semestre quente e de maio até setembro o semestre frio. Sendo assim, as imagens foram divididas de acordo com a data de aquisição, fazendo parte do período quente as imagens de do final do mês de outubro até o final do mês de abril e do período frio as imagens de maio ao início de outubro.

Em geral, foi notável a maior concentração de áreas úmidas no período mais quente, onde a frequência da ocorrência dessas áreas estava mais densa nas áreas bastante próximas

ao canal (Figura 4.6), apresentando menor frequência, na margem sudeste do canal nas proximidades do rio Piratini, pois estas são áreas que estão frequentemente inundadas.

Por outro lado, no período frio a distribuição das áreas úmidas mostrou-se menos presente nas imagens analisadas. As maiores concentrações estão localizadas nas proximidades dos principais corpos d'água: Canal São Gonçalo, Lagoa Formosa, foz do rio Piratini e Lagoa Fragata, que por influência de outros fatores, como nível dos corpos d'água, vazão, presença de vegetação mais densa, acabam por auxiliar na ocorrência de áreas úmidas (Figura 4.7).

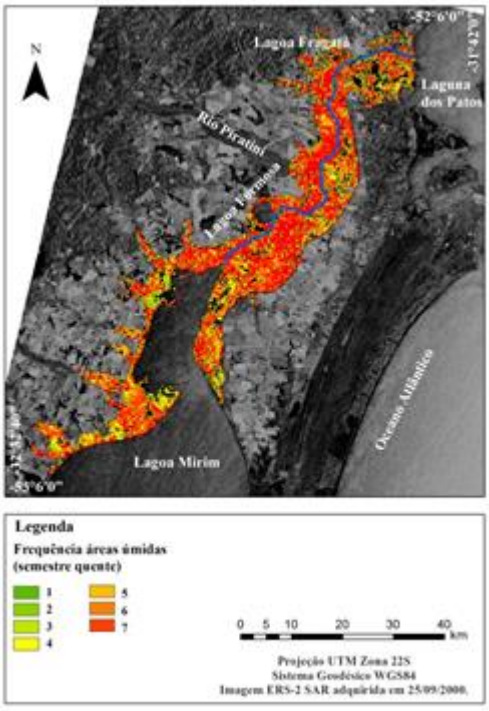

Figura 4.6: Frequência da ocorrência das Áreas úmidas no período quente.

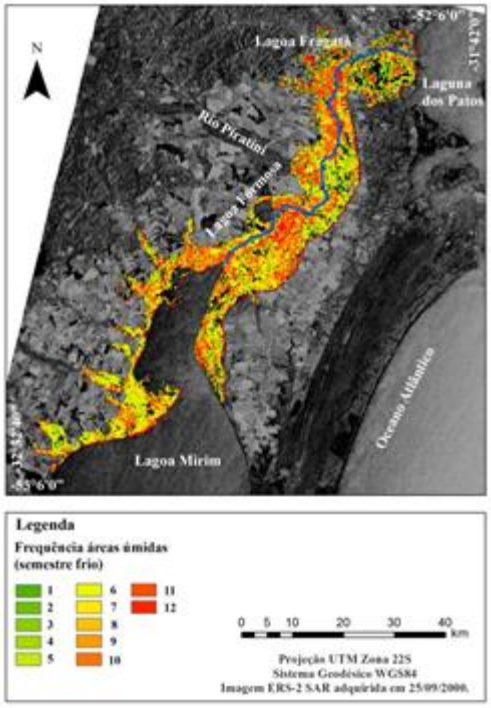

Figura 4.7: Frequência das áreas úmidas no período frio.

As áreas inundadas, ao contrário das úmidas, apresentaram-se mais frequentes no período frio, onde é possível observar maior concentração na região central da área de estudo, próxima à foz do Rio Piratini, bem como na margem sudeste na mesma direção (Figura 4.8). O fato dessa maior frequência próximo aos cursos d'água pode estar ligado às altas taxas de precipitação que auxiliam no aumento do nível e da vazão dos corpos d'água, ocasionando frequentes inundações nos meses de inverno. Já para o período quente, essas áreas mostraram-se pouco frequentes, havendo somente uma pequena concentração na margem sudeste na parte central da área de estudo (Figura 4.9). Esta tendência de localização, no período com

poucos eventos de áreas inundadas, pode ser devido à presença de pequenos corpos d'água que facilitam a inundação no seu entorno, mesmo em períodos de pouca precipitação.

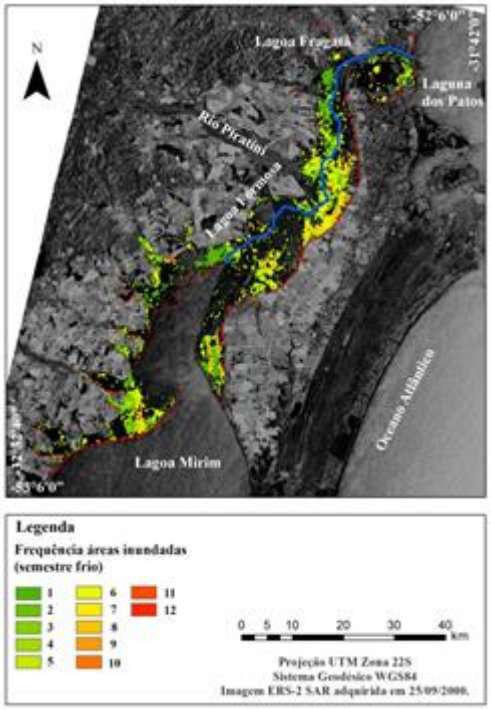

Figura 4.8: Frequência da ocorrência das áreas inundadas no período frio.

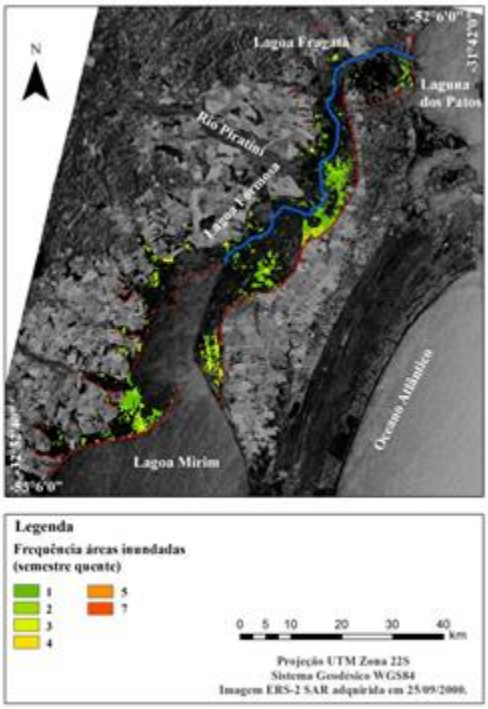

Figura 4.9: Frequência das áreas inundadas no período quente.

4.2.3. Análise da frequência de ocorrência de áreas úmidas ou inundadas nas áreas adjacentes ao Canal São Gonçalo

Devido à dinâmica de frequência de distribuição que as áreas úmidas e inundadas apresentaram ao longo da área de estudo, foi indispensável a espacialização combinada de áreas úmidas e inundadas para saber qual a classe mais frequente em cada pixel da área de estudo. O resultado foi a maior frequência de áreas úmidas, como esperado, ao longo da planície. Essas áreas apresentaram frequência em aproximadamente 88.628 ha da área de estudo, o que representa 73,99% da área total. Porém algumas pequenas áreas, como a área central na margem sudeste, mostraram as áreas inundadas como mais frequentes ao longo da análise das 19 imagens, totalizando 11.846 ha, ou 9,89% da área de estudo, ocupadas com mais frequência por áreas inundadas (Figura 4.10). Ainda é possível destacar que 1.451 ha apresentaram mesma frequência de ocorrência de áreas úmidas e inundadas, e 17.859 ha não

foram classificados nem como áreas úmidas nem inundadas, totalizando 1,21% e 14,91%, respectivamente.

Esta constatação vem a corroborar as análises realizadas nos subcapítulos anteriores, pois verificou-se que as áreas úmidas eram realmente mais densas ao longo de toda a área do canal, porém na área central na margem sudeste existem pequenos corpos d'água que auxiliam na ocorrência de inundações com mais frequência.

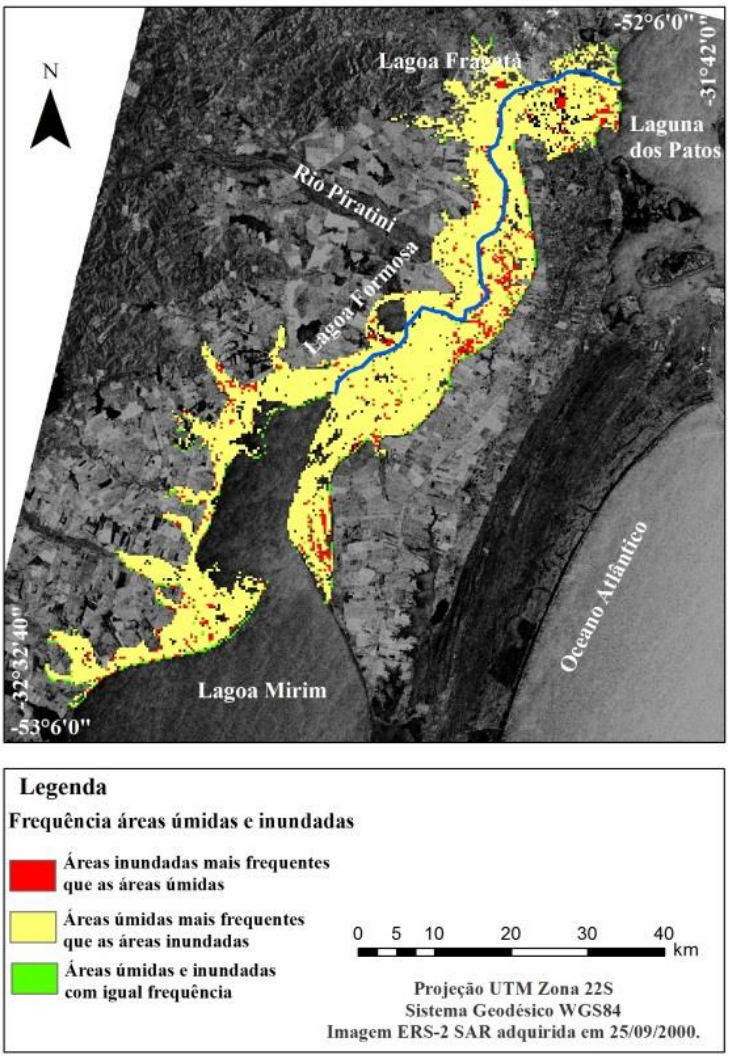

Figura 4.10: Ocorrência mais frequente de áreas úmidas ou inundadas ao longo da série temporal.

4.3. Extensão das áreas úmidas e inundadas e fatores ambientais

De acordo com Hartmann *et al.* (1986) na área do Canal São Gonçalo as ações ambientais que mais afetam a hidrologia estão relacionadas aos aspectos meteorológicos, principalmente os ligados à precipitação nas bacias de drenagem das Lagunas dos Patos e Mirim e às variações anemométricas locais. Logo, as variações na extensão das áreas úmidas e inundadas foram analisadas juntamente com fatores meteorológicos associados.

Os dados meteorológicos analisados neste trabalho (*i.e.*, adquiridos pela estação meteorológica de Pelotas) foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Porém nos anos de 1992, 1995, parte de 1999 e 2001, não há dados disponíveis. Portanto não será possível analisar as variações em extensão de áreas úmidas e inundadas estimadas nos anos citados. Os dados de precipitação e temperatura mínima são medidos às 12h UTC (*Coordinated Universal Time* – Tempo Universal Coordenado), que corresponde às 9h na área de estudo. Os demais dados são medidos às 00h UTC, correspondendo às 21h na área de estudo. Além dos dados citados, também foram utilizados dados do Boletim Climanálise do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), os quais fornecem boletins meteorológicos que englobam aspectos climáticos, atmosféricos, hidrológicos, dentre outros, para as regiões do Brasil em diferentes épocas. Os dados do Climanálise serviram para complementar as análises efetuadas, já que no boletim há descrição dos sistemas que atuaram na região durante o mês de aquisição de cada imagem.

4.3.1. Precipitação

O primeiro aspecto a ser analisado é a precipitação. Para tanto, foram considerados os dados acumulados de 30, 15 e 7 dias antes da data da aquisição das imagens. Ao avaliar os dados (Figura 4.11), constata-se que o período que mostrou maior relação com os dados de áreas úmidas foi a precipitação acumulada dos 30 dias anteriores a aquisição da imagem, porém a análise do fenômeno nos 15 e 7 dias anteriores mostrou-se indispensável.

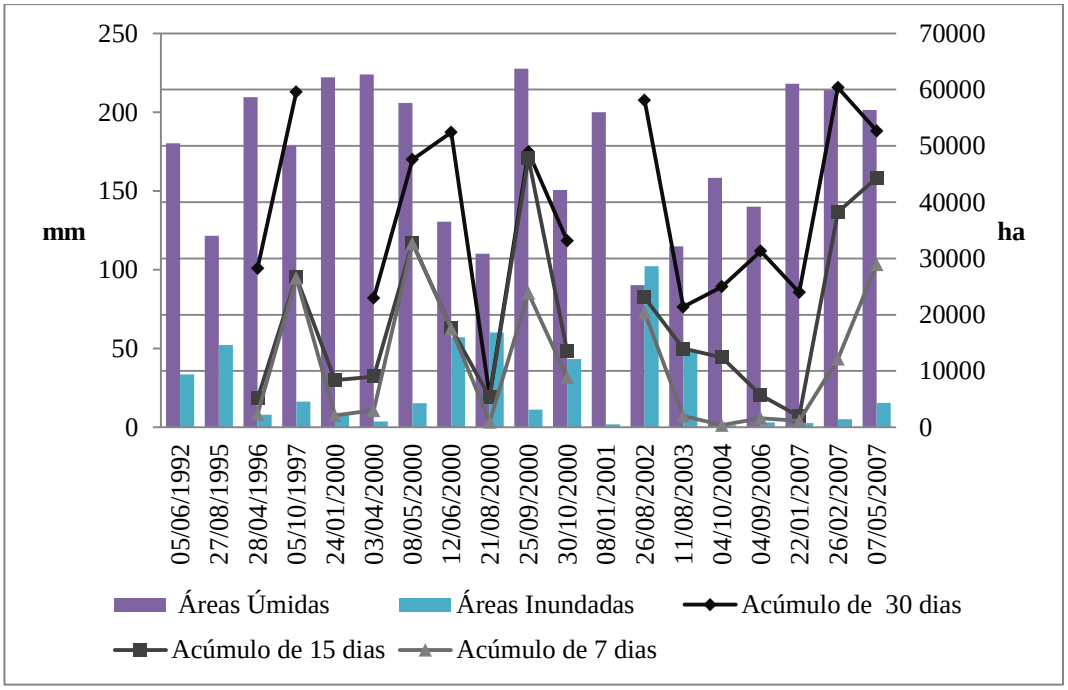

Figura 4.11: Relação entre a extensão das áreas úmidas e inundadas, e a precipitação acumulada nos 30, 15 e 7 dias que antecederam as aquisições das imagens.

As maiores ocorrências de áreas úmidas estão diretamente relacionadas aos períodos de maior precipitação (Figura 4.11), pois a maior parte das grandes extensões dessas áreas está relacionada à precipitações acumuladas de mais de 150 mm nos 30 dias que antecederam a aquisição das imagens. Além disso, é possível observar que na data com maior extensão de áreas úmidas (*i.e.*, 25/09/2000) a precipitação mostrou-se mais intensa nos 15 dias que antecedem a aquisição da imagem, e foi uma precipitação causada, segundo Climanálise (2000F), por sistemas frontais que ao atuarem na região ocasionaram períodos chuvosos no mês de setembro de 2000.

Já com relação a imagem que apresentou maior área inundada (*i.e.*, 26/08/2002), a precipitação mostrou-se bastante distribuída durante os 30 e 15 dias que antecederam a imagem. O mesmo ocorreu com as imagens de 12/06/2000 e 30/10/2000, que apresentam significativas áreas inundadas e precipitação bastante distribuída nos 30 dias anteriores. Para o mês de agosto de 2002, De acordo com Climanálise (2002) os sistemas frontais que aturam no Rio Grande do Sul resultaram em valores de precipitação entre 50 mm e 100 mm acima da média climatológica. Em outubro de 2000, conforme Climanálise (2000G) registra que devido à atuação de vórtices ciclônicos em altos níveis e áreas de instabilidade associadas à formação de Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) ocorreram chuvas acima da média

climatológica. Já em junho de 2000, os dados do Climanálise (2000D) afirmam que os vórtices ciclônicos em altos níveis em conjunto com alguns sistemas frontais contribuíram para as anomalias positivas de precipitação no Rio Grande do Sul. No extremo sul do Estado, observou-se anomalia negativa de até 100 mm, justamente onde se localiza a área de estudo, porém na análise dos dados observa-se significativa precipitação acumulada nos 30 dias antes da imagem.

Por outro lado, a imagem de 28/04/1996, resultou em consideráveis extensões de áreas úmidas associadas a uma menor precipitação acumulada, principalmente nos 15 dias e 7 dias anteriores à imagem, 18,4 mm. Esta precipitação abaixo da média é resultado, segundo o Climanálise (1996), do rápido deslocamento dos sistemas frontais na região Sul. Também no dia 21/08/2000, que resultou em extensa área inundada na classificação, ocorrem baixas precipitações acumuladas, apenas 19,9 mm nos 30 dias, 19,04 mm nos 15 dias e 3,5 mm nos 7 dias. Os dados do Climanálise (2000E) indicam que nesse mês predominaram anomalias negativas de precipitação na região, pois as frentes frias chegaram à Região Sul com pouca intensidade.

Em termos gerais, o que se pode perceber ao analisar a figura 4.10, e de acordo com o que foi observado no capítulo 4.1 e 4.2, é que os maiores índices de áreas úmidas ocorrem nos primeiros meses do ano, mais precisamente de janeiro a maio. Este último é justamente o mês em que segundo Cavalcanti *et al.* (2009) inicia a ocorrência de condições baroclínicas[1] mais intensas sobre o sul do Brasil, devido ao maior gradiente latitudinal de temperatura da região. Ainda de acordo com os autores, as ondas baroclínicas são mais intensas no inverno e são deslocadas em direção aos subtrópicos, causando frequente ciclogênese e maior penetração das frentes. Esse fator é o causador da alta frequência de formação de ciclones na costa sul do Brasil, sobretudo no inverno e na primavera. Além disso, esses eventos são os responsáveis por precipitações acima do normal na Região Sul.

Após a notável frequência de extensas áreas úmidas até o mês de maio, é que ocorrem as mais intensas áreas inundadas, que são os meses de junho e agosto, os quais são marcados por grandes precipitações, como pode ser comprovado na figura 4.11, especialmente nas datas de 12/06/2000 e 26/08/2002.

[1] Baroclínica deriva de baroclinia que, segundo o glossário do CPTEC, é um estado do escoamento de fluído em que as isóbaras e isotermas não coincidem, ou seja, a temperatura varia sobre superfícies isobáricas. (Sua intensidade e direção são obtidas através do produto vetorial entre o gradiente térmico e o gradiente de pressão.)

4.3.2. Fenômenos El Niño e La Niña

Devido ao fato de os fenômenos El Niño e La Niña estarem diretamente ligados à variabilidade interanual do clima no Brasil, viu-se a necessidade de analisar esses dados para as datas de aquisição das imagens. O El Niño corresponde a um fenômeno atmosférico-oceânico caracterizado pelo aquecimento anormal das águas superficiais do oceano Pacífico Tropical, que pode afetar o clima regional e global. Já a La Niña representa um fenômeno oceânico-atmosférico com características opostas ao El Niño, e que se caracteriza por um esfriamento superficial das águas do oceano Pacífico Tropical (http://enos.cptec.inpe.br/). Ambos os fenômenos apresentam distintas modificações, principalmente no regime de precipitação, nas diversas partes do globo.

Em episódios de El Niño, são comuns na Região Sul do Brasil, onde está localizada a área de estudo, precipitação abundante principalmente na primavera, e chuvas intensas de maio a julho, bem como aumento da temperatura média. Já os períodos de La Niña são marcados por secas severas (http://enos.cptec.inpe.br/). Nos episódios de La Niña também são comuns as anomalias positivas de circulação e precipitação em janeiro, principalmente no Centro-Leste e Sul do Brasil (CAVALCANTI *et al*., 2004).

O que se pode observar de acordo com a figura 4.12 é que as maiores extensões de áreas úmidas ocorrem em anos de fenômeno La Niña, porém alguns anos de El Niño também apresentam significativas áreas úmidas, principalmente nos meses de verão. Em anos com a presença de La Niña também ocorrem áreas inundadas. Contudo, é importante frisar que a maior extensão de áreas inundada ocorreu em um período de El Niño, em um mês de inverno (26/08/2002) associado à significativa precipitação acumulada. As menores extensões de áreas inundadas também ocorreram na presença do fenômeno El Niño, nos meses outubro de 2004, setembro de 2006 e janeiro e fevereiro de 2007 (Figura 4.13).

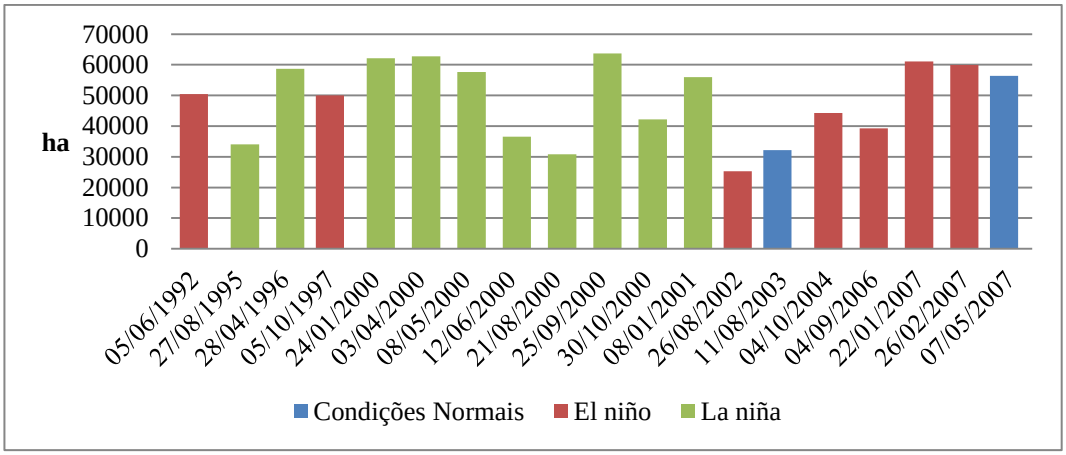

Figura 4.12: Evolução das áreas úmidas de acordo com os fenômenos El Niño e La Niña.

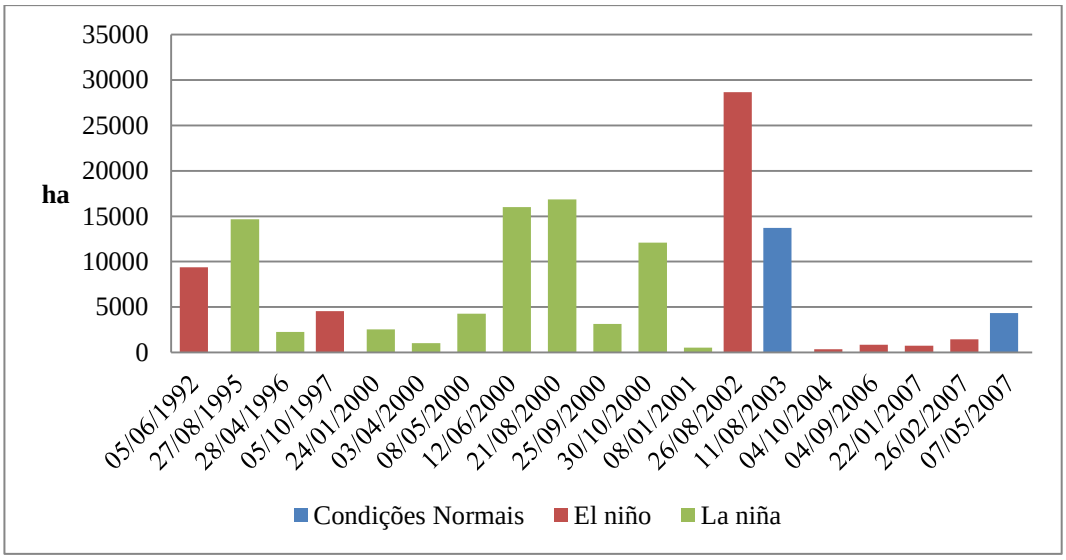

Figura 4.13: Evolução das áreas inundadas de acordo com os fenômenos El Niño e La Niña.

Ao analisar a figura 4.14, que demonstra a ocorrência de chuva acumulada, áreas úmidas e inundadas e também o fenômeno predominante, é possível obter uma visão mais ampla dos fenômenos que ocorreram na data de cada uma das imagens. Outro fato que merece destaque são os picos de precipitação que se encontram nos eventos El Niño, exemplos são as imagens de 26/02/2007 e 05/10/1997, com chuva acumulada nos 30 dias de 215,6 mm e 212,8 mm respectivamente.

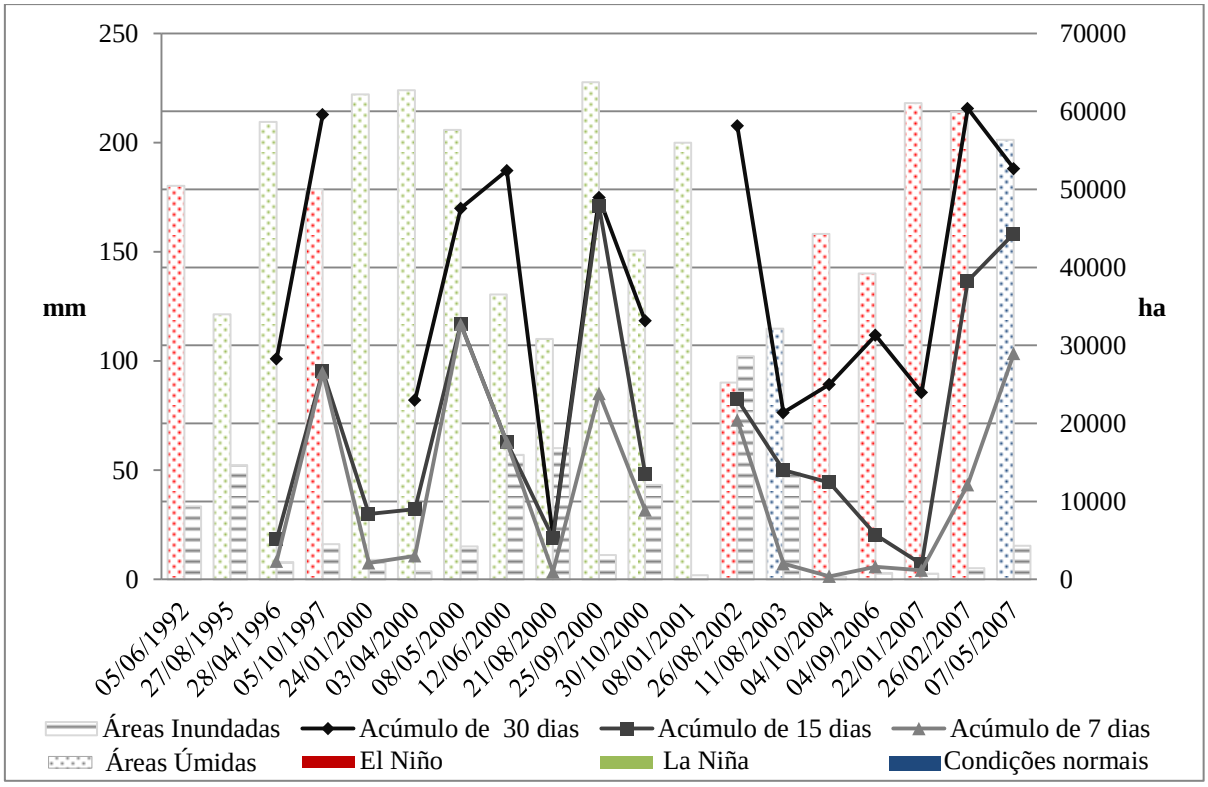

Figura 4.14: Áreas úmidas e inundadas, precipitação acumulada nos 30, 15 e 7 dias que antecedem a data de aquisição das imagens e ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña.

Também foi observado que em períodos de El Niño, a planície do canal alaga com chuvas constantes durante os 30 dias antes da data da aquisição da imagem, como registrado na imagem de 26/08/2002. Já em eventos de La Niña, é indispensável que ocorra chuvas concentradas nos dias mais próximos à aquisição da imagem, como por exemplo, nas imagens de 12/06/2000 e 21/08/2000. E para a ocorrência de maiores extensões das áreas úmidas, independente de El Niño ou La Niña, é comum que ocorram precipitações bem distribuídas ao longo dos 30 dias que antecedem a imagem.

Ao considerar somente as extensões de áreas úmidas as que apresentaram área acima de 55.000 ha pode-se analisar, por meio dos dados do Climanálise (1996, 2000A, 2000B, 2000C, 2000F) que nos anos de La Niña as maiores ocorrências de áreas úmidas coincidem com a anomalia positiva de precipitação ligada à sistemas frontais, fenômeno meteorológico comum em todos os meses considerados (*e.g.*, 04/1996, 01/2000, 04/2000, 05/2000 e 09/2000).

4.3.3. Direção e velocidade dos ventos

Os ventos também possuem relação direta com a ocorrência das áreas úmidas na planície de inundação do Canal São Gonçalo, pois segundo Telles (2002), a ação prolongada de ventos fortes em uma mesma direção pode ser responsável por inundações, impelindo as águas sobre os terrenos mais baixos. Por tratar-se de uma área plana, pode-se associar a ocorrência também das áreas úmidas à ação dos ventos.

Para esta análise foram utilizados dados da velocidade média dos ventos no dia da aquisição de cada imagem, bem como um dado mensal de direção predominante do vento. Como este dado é disponibilizado para o mês, e algumas imagens foram adquiridas no início do mês, sofrendo assim mais influência da velocidade predominante no mês anterior, associaram-se os dados das imagens datadas dos primeiros 10 dias de um mês à direção do vento do mês anterior.

Na análise da figura 4.15, compreende-se que as maiores áreas úmidas estão relacionadas aos ventos de leste e nordeste, o qual é predominante na região. Já as grandes áreas inundadas estão atreladas aos ventos de nordeste e em apenas um evento à vento sudeste (Figura 4.16) .

A velocidade média do vento também está relacionada à ocorrência de áreas úmidas (Figura 4.17), onde em geral, nas áreas com maior ocorrência de ventos estão as maiores áreas úmidas. Outro fator interessante é que as áreas úmidas associadas aos ventos mais fortes são as mesmas que não estão associadas à grandes precipitações.

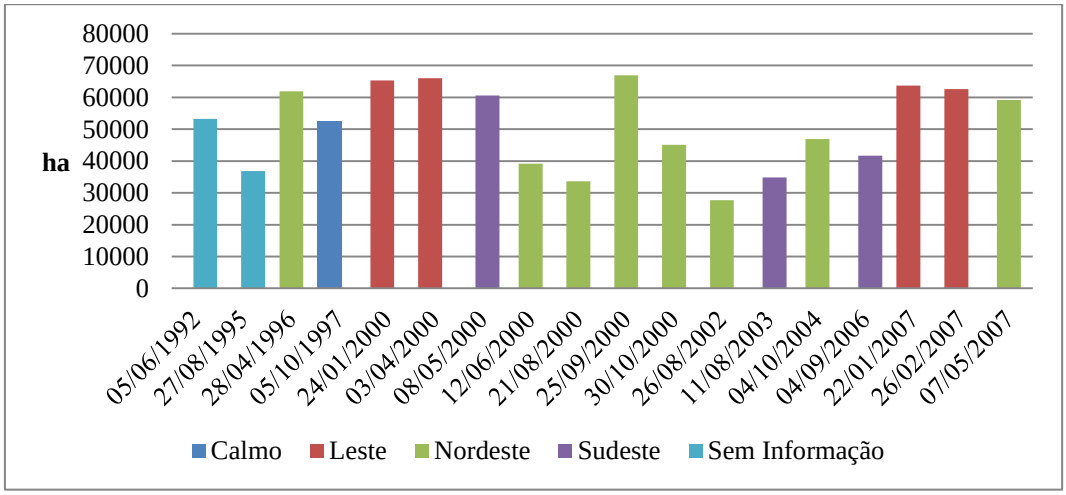

Figura 4.15: Análise da extensão das áreas úmidas e direção predominante do vento.

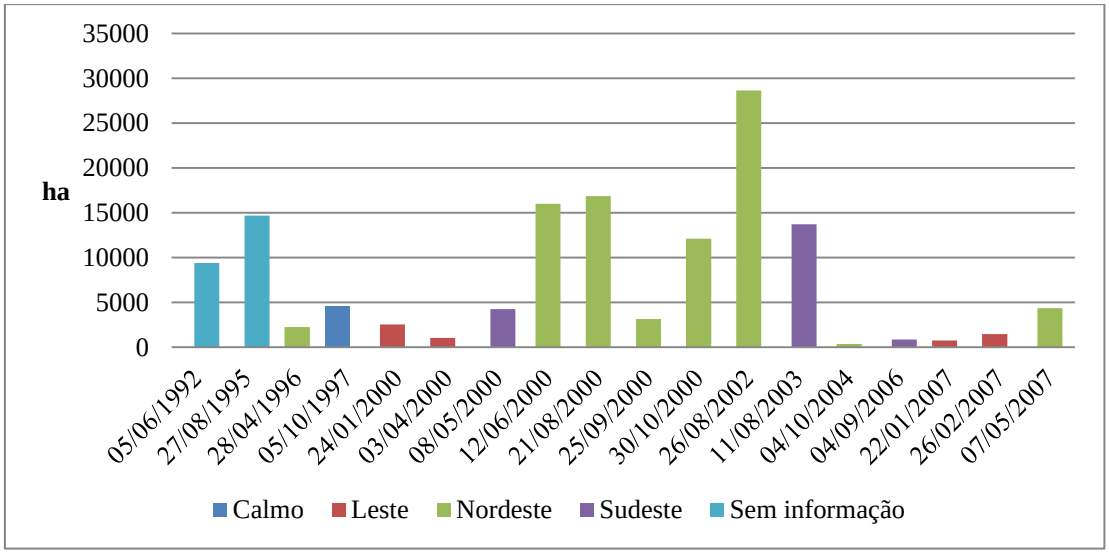

Figura 4.16: Análise das áreas inundadas e direção predominante do vento.

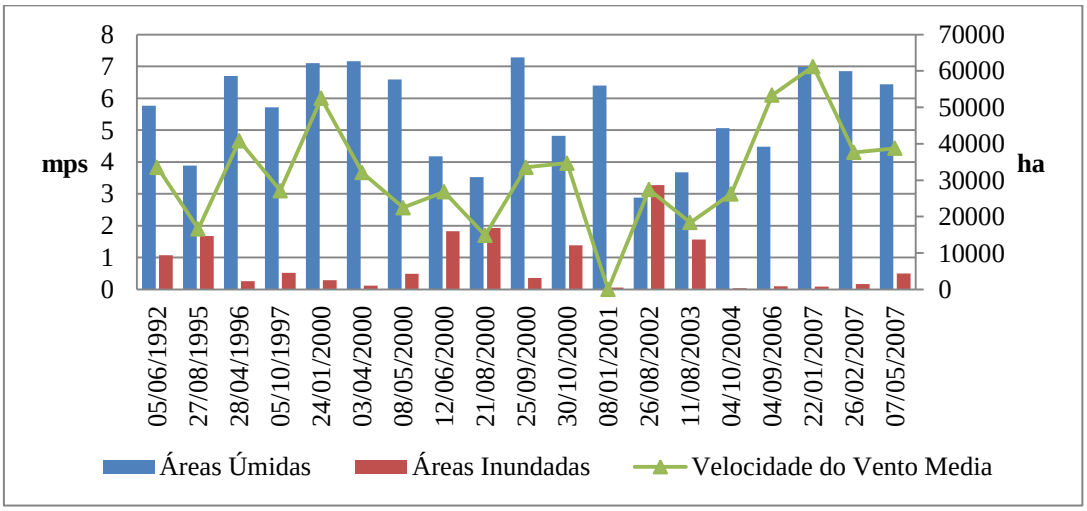

Figura 4.17: Influência da velocidade média do vento na extensão de áreas úmidas e inundadas.

4.3.4. Análise da influência de parâmetros ambientais nas variações das áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo

Esse capítulo apresenta uma discussão integradora, na tentativa de apontar quais os fatores ambientais são mais atuantes na variação na extensão das áreas úmidas e inundadas. Para tanto, foram consideradas como as maiores ocorrências de áreas úmidas as extensões acima de 60.000 ha (*e.g.*, identificadas nas imagens adquiridas em 24/01/2000, 03/04/2000, 25/09/2000 e 22/01/2007) e como as maiores extensões de áreas inundadas as que

apresentaram extensão acima de 10.000 ha (*e.g.*, identificadas nas imagens adquiridas em 12/06/2000, 21/08/2000, 30/10/2000, 26/08/2002 e 11/08/2003).

Assim, é possível definir que precipitação bem distribuída ao longo dos 30 dias que antecedem a aquisição da imagem, com direção de vento leste predominante e com velocidade média de 4 até 7m/s, resultam em extensas áreas úmidas. Porém, há exceção na extensão das áreas úmidas em 25/09/2000, que apresenta a precipitação acumulada apenas nos 15 dias que antecedem a aquisição da imagem, e predominância de ventos de nordeste.

As maiores ocorrências de áreas úmidas nas condições de ventos de leste podem estar associadas ao represamento de água no canal devido à atuação dos ventos na desembocadura do mesmo, impossibilitando que o canal desague na Laguna dos Patos, como é comum em seu fluxo normal. Sendo assim, essa condição associada com precipitação bem distribuída ao longo de 30 dias, acaba por concentrar as áreas úmidas ao longo da planície de inundação do canal.

De acordo com Hartmann & Schettini (1991), na desembocadura da Laguna dos Patos podem ocorrer situações de vazão excepcional, quando os totais de precipitação estão acima do normal nas bacias que contribuem com água para a laguna, em conjunto com ventos do quadrante norte, acarretando uma perda de identidade estuarina, encontrando-se assim um deslocamento unidirecional no sentido jusante, tipicamente fluvial.

Portanto, é necessário considerar a possibilidade dessa situação de vazão excepcional na análise dos dados da imagem de 25/09/2000, já que esta apresentou a maior precipitação acumulada em 15 dias dentre todas as datas analisadas (*i.e.*, 171 mm), associada a ventos de nordeste, que podem ter ocasionado este fenômeno na região. Neste contexto atípico, a vazão excepcional pode ter modificado a dinâmica da vazão do canal, represando as águas no seu interior, já que a orientação do canal é Sudoeste – Nordeste e os ventos predominantes estão no sentido nordeste.

Também é possível afirmar que a precipitação acumulada mais constante nos 30 dias que antecedem a aquisição da imagem, junto com a direção do vento nordeste e velocidade média do vento variando entre 1,7 e 4 m/s, resulta em uma maior extensão nas áreas inundadas na planície do Canal São Gonçalo. Porém, neste caso também há exceção na imagem adquirida em 11/08/2003, que apresentou pouca chuva acumulada e ventos de sudeste, entretanto resultou em extensas áreas inundadas.

Vale destacar que esta exceção pode ser explicada por meio da afirmação de Hartmann e Harkot (1990) que destacam que as marés, apesar de quase inexpressivas nesta área (*i.e.*, média anual de 47 cm), têm sua influência aumentada quando em épocas de estiagem e

quando auxiliadas por ventos do quadrante sul. Ainda é necessário acrescentar que na época da aquisição da imagem não atuavam nem o fenômeno El Niño nem La Niña, com predomínio de condições normais, e que os dados do Climanálise (2003) apontam chuvas abaixo do normal para a Região Sul. Com base no exposto e em conjunto com a predominância dos ventos sudeste, pode-se concluir que a atuação das marés pode ter causado um represamento das águas no Canal São Gonçalo causando inundações principalmente na área central nas margens sudeste e noroeste nas proximidades da foz do rio Piratini.

Já nas ocasiões mais comuns, caracterizada pela atuação de ventos nordeste, o que pode explicar a ocorrência de áreas inundadas é também o represamento das águas do canal. Deve-se observar que na ocasião da imagem de 25/09/2000, a qual foi utilizada no decorrer de todo o trabalho como a imagem com a maior presença de áreas úmidas, essas áreas provavelmente evoluíram no mês seguinte para inundações. Isto pode ser confirmado por meio da imagem de 30/10/2000, mês subsequente, na qual também predominava o vento nordeste, porém com chuva acumulada mais constante nos 30 dias que antecederam a imagem, o que resultou em uma extensão de 12.109,8 ha de áreas inundadas. Sendo assim, pode-se confirmar que as áreas inundadas ocorrem com mais frequência na atuação de ventos nordeste e precipitação acumulada nos 30 dias que antecedem a análise.

5. CONCLUSÕES

O método de classificação de áreas úmidas e inundadas por meio de limiar de valor de retroespalhamento e razão entre imagens SAR, utilizado neste estudo, permitiu a análise de variação das extensões de áreas úmidas e inundadas para diferentes períodos.

Os primeiros meses do ano apresentaram maiores extensões de áreas úmidas. Além disso, ao se aproximar dos meses de inverno as áreas úmidas dão lugar às áreas inundadas, principalmente no mês de agosto. Porém, a maior extensão de áreas úmidas foi registrada no mês de setembro de 2000, apresentando 63.742,2 ha de áreas úmidas, enquanto a menor extensão dessas áreas ocorreu no mês de agosto de 2002, com 25.247,20 ha. Já as áreas inundadas apresentaram significativa extensão somente nos meses de junho, agosto e outubro, sendo em agosto de 2002 a maior extensão dessas áreas, 28.632,2 ha.

Além disso, é possível afirmar que as áreas úmidas distribuem-se em toda a área adjacente ao canal e que as áreas inundadas estão concentradas na área central da área de estudo, tanto na margem noroeste, próximo à foz do rio Piratini, quanto na margem sudeste do canal. No período mais quente, há maior frequência de ocorrência das áreas úmidas, enquanto no período mais frio são frequentes as inundações na planície de inundação do canal, principalmente na área central e próximo aos principais corpos d'água.

Devido a maior ou menor ocorrência de áreas úmidas e inundadas estarem concentradas em certos meses do ano viu-se a possibilidade de analisar essas ocorrências com fatores meteorológicos. Assim, foi considerado o resultado da classificação com períodos de precipitação acumulada. As áreas úmidas mostraram-se diretamente relacionadas aos períodos de maior precipitação, pois as maiores extensões dessas áreas estão relacionadas à precipitação acumulada de 30 dias maiores que 150 mm. As áreas inundadas também mostraram relação com a precipitação, pois as maiores extensões dessas áreas estão relacionadas à precipitação concentrada nos 30 dias que antecedem a data das imagens.

Como os fenômenos El Niño e La Niña estão relacionados à variabilidade climática no Brasil, eles também integraram a análise, constatando-se que o fenômeno La Niña mostrou maior relação com a ocorrência de áreas úmidas, mesmo não estando ligado às maiores precipitações. Já o fenômeno El Niño, mostrou relação direta com as maiores precipitações, porém não houve uma relação direta com as áreas úmidas ou inundadas, mesmo que ambas tenham ocorrido também na presença do fenômeno. Este fato pode estar relacionado ao menor número de imagens com a atuação do fenômeno El Niño.

Mesmo com a dificuldade de traçar uma situação de condições ambientais que resultasse em áreas úmidas ou inundadas, foi possível definir que as maior parte das grandes extensões de áreas úmidas estão associadas à precipitação bem distribuída ao longo dos 30 dias que antecedem a análise, ventos leste com velocidade média entre 4 e 7 m/s. Já as grandes extensões de áreas inundadas ocorrem em situação de precipitação mais concentrada nos 30 dias que antecedem a imagem, com predomínio de ventos na direção nordeste e velocidade média de 1,7 a 4m/s.

Além disso, um condicionante que possui considerável influência na ocorrência das áreas úmidas e inundadas são os sistemas frontais, bastante comuns na região. Estes sistemas influenciam na precipitação, velocidade e direção dos ventos, que como visto atuam na dinâmica de períodos úmidos e inundados na planície de inundação do Canal São Gonçalo. Os boletins meteorológicos mostram que estes fenômenos atuam em todos os meses analisados e influenciam nos aspectos meteorológicos da região.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA DA LAGOA MIRIM – ALM UFPEL – **Barragem Eclusa**. Disponível em: < http://alm.bolsacontinental.com/index.php?file=kop13.php> Acesso em: 11 fev. 2013.

ARIGONY-NETO, J. **Monitoring glacier parameters on the Antarctic Peninsula – a centerline approach combining satellite and GIS data.** 2006. 136 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Ciências Ambientais e Florestais, Universidade de Freiburg (Albert-Ludwigs), Freiburg, 2006.

ARONOFF, S.; PETRIE, G. Active sensors: Radar and lidar. In: ARONOFF, S. **Remote sensing for GIS managers**. Califórnia: ESRI Press, 2005. p. 197 – 244.

ASTER GDEM. **Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM) Version 2**. October, 2011. Disponível em: < http://www.ewb.neu.edu/wiki/files/Aster_Information.pdf > Acesso em: 10 mai. 2012.

BESKOW, P. R. A formação da economia arrozeira no Rio Grande do Sul. **Ensaios FEE**, Porto Alegre, 4(2), 1984, p. 55 – 84. Disponível em: < revistas.fee.tche.br/index.php/ensaios/article/download/322/542> Acesso em: 05 mar. 2013.

Bourgeau-Chavez, L. L.; Scarbrough, K.; Miller, M. E.; Laubach, Z.; Endres, S.; Banda, E.; Battaglia, M.; Landon, A.; Jenkins, N.; Powell, R.; Brooks, C. **Mapping coastal great lakes wetlands and adjacent land use through hybrid optical-infrared and RADAR image classification techniques**. Michigan Tech, Research Institute. June, 2012.

BRASIL. **Lei Nº 12.651**, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm > Acesso em: 10 abr. 2013.

BURGER, M.I. **Situação e ações prioritárias para a conservação de banhados e áreas úmidas da zona costeira.** Disponível em:< http://cncflora.jbrj.gov.br/plataforma2/arquivos /biblio/4f99bb7d20a73_4f919c6440f66_BERGES2000BanhadosNorteRS.pdf > Acesso em: 30 jan. 2013.

CARVALHO, A. B. P.; OZORIO, C. P. Avaliação dos banhados do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 1, n. 2, p. 83 – 95, 2007.

CAVALCANTI, I. F. de A.; NELSON, J. F.; SILVA, M. G. A. J. da.; DIAS, M. A. F. da S. (Orgs). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, 463 p.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais**. Curitiba: Departamento de Geomática da UFPR, 2003, 210 p.

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista: INPE/CPETEC, 1996, v.11, n.04..

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista: INPE/CPETEC, 2000A, v.15, n.01.

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista: INPE/CPETEC, 2000B, v.15, n.04.

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista: INPE/CPETEC, 2000C, v.15, n.05.

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista: INPE/CPETEC, 2000D, v.15, n.06.

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista: INPE/CPETEC, 2000E, v.15, n.08.

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista: INPE/CPETEC, 2000F, v.15, n.09.

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista: INPE/CPETEC, 2000G, v.15, n.10.

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista: INPE/CPETEC, 2003, v.18, n.08.

COWARDIN, L. M.; CARTER, V.; GOLET, F. C.; LAROE, E. T. **Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States.Washington**: U.S. Department of the Interior Fish and Wildlife Service Office of Biological Services, 1979. 131 p.

DARONCH, M. C.; CABRAL, I. L. L.; PRADO, R. J. O impacto da rizicultura e pecuária sobre os banhados do Jacaré e Grande – município de São Borja/RS. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference of Geomorphology, 2006, Goiânia - GO. **Anais Eletrônicos...** Disponível em: < http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/sinageo/articles/519.pdf >

DIAS, G. **Delineating wetlands using multitemporal RADARSAT**. Applied Geomatics Research Group, 2002. Disponível em: < http://agrg.cogs.nscc.ca/gallery2/main.php ?g2_view=core.DownloadItem&g2_itemId=787> Acesso em: 3 fev. 2013.

ELACHI, C.; ZYL, J. V. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing.** 2rd edition, John Wiley & Sons Inc., 2006, 552p.

ERDAS. **IMAGINE AutoSync user's guide**. United States of America, 2008. Disponível em: < http://faculty.une.edu/cas/szeeman/rs/docs/AutoSync.pdf > Acesso em: 01 jun. 2013.

ESA. **NEST (Next ESA SAR Toolbox) user manual**. Version 4B. Disponível em: <http://nest.s3.amazonaws.com/docs/nest_user_manual- 4B.pdf> Acesso em: 11 abr. 2012.

FAO SAFR. **Wetland characterization and classification for sustainable agricultural development**. Harare, 1998. Disponível em: < http://www.fao.org/docrep/003/X6611E/X6611E00.HTM > . Acesso em: 01.nov.2012.

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – RS – **Litoral Sul**. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/programas/gerco_sul.asp> Acesso em: 05 fev. 2013.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, 160 p.

GAZULHA, V. **Comunidade zooplantônica associada a banhado e lagoa interna no sistema hidrológico do Taim, costa sul do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2004. 127f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Programa de Pós-Graduação em Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

HARTMANN, C. ; LAMPARELLI, R. A. C. ; ROSA, R. ; SANO, E. E. . Avaliação da área de inundação do canal de São Gonçalo através de imagens TM-Landsat 5. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 4., 1986, Gramado, RS. Anais.... São José dos Campos: INPE, 1986. v. 1. p. 654-659.

HARTMANN, C.; SCHETTINI, C. A. F. Aspectos hidrológicos na desembocadura da Laguna dos Patos – RS. **Revista Brasileira de Geociências**. 21 (4), dezembro de 1991, p. 371 – 377. Disponível em: < http://repositorio.furg.br:8080/jspui/bitstream/1/3217/1/Aspectos%20hidrol%C3%B3gicos%20na%20regi%C3%A3o%20da%20desembocadura%20da%20Laguna%20dos%20Patos,%20Rs.pdf > Acesso em: 10 jul. 2013.

HARTMANN, C.; HARKOT, P. F. C. Influência do Canal São Gonçalo no aporte de sedimentos para o estuário da Laguna dos Patos – RS. **Revista Brasileira de Geociências**, volume 20, 1990. P. 329 – 332. Disponível em: < http://repositorio.furg.br:8080/jspui/bitstream/1/3259/1/Influ%C3%AAncia%20das%20%C3%A1guas%20do%20canal%20S%C3%A3o%20Goncalo%20no%20aporte%20de%20sedimentos%20para%20o%20estu%C3%A1rio%20da%20Laguna%20dos%20Patos,%20RS.pdf> Acesso em: 10 mai. 2013.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** São José dos Campos: Parêntese, 2011, 598p.

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F.; LOURIVAL, R.; WITTMANN, F.; KANDUS, P. LACERDA, L. D.; BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; NUNES DA CUNHA, C.; MALTCHIK, L.; SCHONGART, J. SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; AGOSTINHO, A. A. Brazilian wetlands: Definition, delineation and classification for research, sustainable management and protection. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**. Disponível em: < http://mc.manuscriptcentral.com/aqc>. Acesso em: 01 jul. 2013.

KOTISIAN, H. B.; MARQUES, D. M. Lagoa Mirim e a Convenção Ramsar: um modelo para ação transfronteiriça na conservação de recursos hídricos. **Revista de gestión del agua de América Latina**; 1(2):101-111, jul.-dic. 2004. Disponível em: < http://bases.bireme.br/cgibin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=171529&indexSearch=ID> Acesso em: 10 mar. 2013.

LILESSAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation**. 5 ed. New York: John Wiley & Sons, 2004. 763 p.

LEWIS A.; F. HENDERSON : Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective. In HENDERSON F. M.; A. J. LEWIS: **Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing.** Vol. 2., 3rd edition, John Wiley & Sons Inc., 1998, p. 131-182.

MALTCHIK, L., COSTA, E.S., BECKER, C.G. & OLIVEIRA, A E. Inventory of wetlands of Rio Grande do Sul (Brazil). **Pesquisas Botânica**, 2003, p. 89-100.

Marinho, R. R.; Paradella, W. R.; Rennó, C. D.; De Oliveira, C. G. Aplicação de imagens SAR orbitais em desastres naturais: Mapeamento das inundações de 2008 no Vale do Itajaí, SC. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 64/3, p. 317-330, 2012.

MENDES JÚNIOR, C. W. **Monitoramento da Zona Superficial de Neve Úmida da Península Antártica pelo uso de dados dos sensores SMMR e SSM/I**. 2011. 148f. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Orgs). **Introdução ao processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Brasília**, CNPQ, 2012, 266 p. Disponível em: < http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8> Acesso em: 08 abr. 2013.

MICHAELIS. **Dicionário Online – Dicionário Michaelis - UOL**. Disponível em: < http://michaelis.uol.com.br/> Acesso em: 28 abr. 2013.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: wetlands and water**. Washington: World Resources Institute, 2005. Disponível em: <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.358.aspx.pdf>. Acesso em: 07.set.2012.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. **Caderno da região hidrográfica Atlântico Sul**. Brasília, 2006.

Moghaddam, M.; McDonald, K. Mapping wetlands of the North American Boreal Zone from satellite radar imagery. in: Geoscience Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS ’03. Proceedings. 2003 IEEE International, Burlingame, CA, USA. 2003. **Anais**… IEEExplore digital library. Artigos p. 261-263. On-line. ISBN0-7803-7929-2. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1293744&url= http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxpls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1293744> Acesso em: 10.out.2012.

NEIFF, J. J. El regimen de pulsos en rios y grandes humedales de Sudamerica. IN: MALVARÉZ, A. I. (ed). **Topico sobre Humedales subtropicales y templados de sudamerica**. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe – ORCYT – Montevideo – Uruguay. 1999. p. 99 – 149.

NOVO, E. M. L. M. Bases teóricas para o uso de imagens SAR no estudo de áreas alagadas. In: 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, Brasil, 2006. **Anais...** EMBRAPA Informática Agropecuária/INPE p. 883 - 894. Disponível em: < http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.08.13.45/doc/p128.pdf> Acesso em: 01 jun. 2013.

NOVO, E. M. L. M.; COSTA, M. P. F. Fundamentos e aplicações de radar no estudo de áreas alagáveis. In: SOUZA, R. B. (Org.). **Oceanografia por satélites.** São Paulo: Ofinica de Textos, 2008. p. 264 – 289.

NOVO, E. L. de M. **Sensoriamento Remoto : Principios e Aplicações**. 4ª ed. São Paulo : Editora Blucher, 388p. 2010.

OZESMI, S. L.; BAUER, M. E. Satellite remote sensing of wetlands. **Wetlands ecology and management 10**. P. 381 – 402. Netherlands.
RADAMBRASIL. Levantamento dos recursos naturais. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro: IBGE. V.33., 1986, 796 p.

PARADELLA, W. R.; AHERN, F.; KUX, H. J.; NOVO, E. L. de M.; COSTA, M. P. de F.; SHIMABUKURO, Y. E.; ALVES, D. S.; VALERIANO, D. de M. O uso de radar orbital em aplicações ambientais na Amazônia brasileira: a avaliação do RADARSAT no programa ADRO. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 8., 1996, Salvador,BA. Anais.... São José dos Campos: INPE, 1996. v. 1. p. 331- 340.

RICHARDS, J. A. E JIA, X. **Remote Sensing Digital Image Analysis : an introduction.** New York: Springer, 2005, 4th ed., 439 p.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei Estadual Nº 11.520**, de 03 de agosto de 2000. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: < http://www.al.rs.gov.br/legiscomp/arquivo.asp?idNorma=11&tipo=pdf> Acesso em: 10 abr. 2013.

ROLON, A. S.; MALTCHIK, L. Áreas palustres: classificar para proteger. **Ciência Hoje**. V. 38, n. 228, p. 66 – 69, jul. 2006.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Uberlândia: EDUFU, 1990. 136 p.

SANTOS, A. R. dos.; PELUZIO, T. M. de O.; SAITO, M. S. **SPRING 5.2.1 passo a passo aplicações práticas**. Alegre, ES: CAUFES, 2010, 153 p.

SEMA – Secretaria do Meio Ambiente – **Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo**. Disponível em: < http://www.sema.rs.gov.br/conteudo.asp?cod_menu=57&cod_ conteudo=6470 > Acesso em: 05 fev. 2013.

SOSINSKI, L. T. W. **Caracterização da Bacia Hidrográfica Mirim - São Gonçalo e o uso dos recursos naturais**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. 35 p.

TAGLIANI, C. R. A.; VICENS, R. S. Mapeamento da vegetação e uso do solo nos entornos da Laguna dos Patos, RS, utilizando técnicas de processamento digital de imagem do SIG SPRING. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003, Belo Horizonte. **Anais Eletrônicos...** Belo Horizonte: INPE, 2003, p. 1461 – 1468. Disponível em: < http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.06.16.55/doc/12_042.pdf> Acesso em: 10 mai. 2013.

TASSI, R. **Gerenciamento hidroambiental de terras úmidas**. 2008. 241f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

TELLES, R. M. **Inundações urbanas nos municípios de Pedro Osório e Cerrito** - RS. 2002. 241f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SEELIGER, U.; ODEBRECHT, C.; CASTELLO, J. P. (Eds). **Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil**. Rio Grande: Editora Ecoscientia, 1998, 341 p.

TEIXEIRA, S. G. **Radar de Abertura Sintética aplicado ao mapeamento e reconhecimento das zonas úmidas costeiras**. 2011. 104 p. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Belém. 2011.

TOUZI, R.; DESCHAMPS, A.; ROTHER, G. Wetland characterization using polarimetric RADARSAT-2 capability. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 33, Suppl. 1, p. S56-S67, 2007.

U.S. Fish & wildlife Service (USFWS). **National Wetlands Inventory**. Disponível em < http://www.fws.gov/wetlands/>. Acesso em: 07.set.2012.